

4 物探方法的综合应用

4.1 覆盖层的探测

4.1.1 覆盖层的地质—物性特点

(1) 覆盖层是指第四纪各种不同成因类型沉积或堆积的松散地层。一般来说，覆盖层的结构比较松散，透水性较强，其中粘土层常为相对隔水层，而砂层和卵（砾）石层则为透水层。

覆盖层的电阻率往往随岩性和含水情况而变化，当颗粒小、含泥多并含水时，电阻率较低；反之则增高，变化幅度较大。在覆盖层中，地下水面通常是一个良好的电性界面。基岩电阻率主要随岩性而异，大多数火成岩、变质岩和沉积岩中的石灰岩具有较高的电阻率，而页岩、泥灰岩、泥质板岩等电阻率则较低；同一岩性，因风化破碎及含水程度不同，其电阻率也会有较大的变化。因此，覆盖层的电阻率，可能低于或可能高于基岩电阻率，也可能无明显差别。

覆盖层的波速通常比基岩波速低，在覆盖层中，地下水面以上的波速又比地下水面以下的波速低，因此，地下水面通常是一个良好的速度界面。基岩顶板一般为良好的折射界面或反射界面。土层或砂层与砂砾石层之间、冲积洪积层与冰积层之间亦可能形成折射界面或反射界面。

(2) 覆盖层随沉积环境和沉积条件的变化，可以形成不同岩性、多层次的沉积物，各层厚度和颗粒组成在水平方向也常有变化，再加上含水条件的不同，往往构成覆盖层物性参数变化较大的特点。

(3) 全风化与强风化基岩的物性参数，常与覆盖层差不多，容易造成物探解释覆盖层厚度时包括基岩全风化和强风化层在内的错误。

4.1.2 覆盖层的探测内容

探测覆盖层的工作内容有：覆盖层厚度探测，覆盖层分层和覆盖层物性参数的测定。

(1) 覆盖层探测任务，通常有库区和坝址两岸及河床覆盖层厚度探测，古河道、河床深槽和基岩河谷形态的探测，天然建筑材料调查中的砂砾料和土料厚度探测以及地下水位探测等。此外，还有厂址、涵闸、隧洞进出口、路基、港口码头及工民建地基勘察中的覆盖层探测。

地面物探（包括陆上和水上）对覆盖层厚度的探测，在层次不多，各层相对于埋深有一定的厚度和物性差异比较明显时，有可能划分 2~3 个大的层次（如壤土—砂砾石—基岩）。否则，只能测定覆盖层的总厚度。

(2) 利用测井方法测定覆盖层的密度、干容重、孔隙度和透水性，测定层厚及深度位置，配合地面物探了解物性层与地质层的关系，提供地面物探定性及定量解释所需要的有关资料。

4.1.3 覆盖层探测的物探方法

(1) 主要有电法勘探、地震勘探、水声勘探、放射性测井和井中流体测量等。

(2) 在地面开阔、工作量较大的测区，地面物探可采用一种方法全面探测，另一种方法在主要测线和地质条件较复杂的地段作辅助探测。通常以点距较大的电测深作全面探测，以点距较小的地震剖面作重点配合，以便综合分析解释。

(3) 当覆盖层中各层具有明显的波阻抗差别并符合 3.2.1.1 及 3.2.1.2 条规定的条件时，可采用浅层反射波法，以利于提高覆盖层分层的地质效果。

(4) 在水库、湖泊、浅海、港口、码头和水面较宽、水较深、水流较缓和沉积物粒径较小的河道，探测水下地形、淤泥和砂层厚度时，宜采用水声勘探。

(5) 用密度测井、井中流体测量测定各层的密度与透水性。当钻孔下有过滤管时，可进行自然伽玛测井，密度测井和井中流

体测量。当钻孔下有普通套管时，只能进行自然伽玛测井和密度测井。

4.1.4 探测覆盖层的测网布置按 3.1、3.2、3.5、3.7 节中各有关物探方法的测网布置条款规定，并使不同物探方法的测网尽量重合。

4.1.5 覆盖层的探测技术

(1) 电测深法一般采用对称四极装置。布极方向在河床和阶地一般顺河向布设，以减少表层不均匀性和地层起伏的影响。在两岸山坡一般沿等高线或顺山脊布设。水上电测深法一般采用三极法顺河漂浮电缆观测。

(2) 地震排列方向（在河床和阶地）一般顺河方向布设。在两岸山坡一般沿等高线或顺山脊布设。水上地震勘探排列，当水面较宽、水流较缓、水较深和覆盖层较厚时，可采用漂浮电缆顺河布设地震剖面，按有关规定测定排列及激发点位置。当水面较窄、覆盖层不厚、水较浅和不影响通航时，可采用横河方向布置地震剖面；有条件跨河架设钢丝绳时，采用水面或水下布置接收排列，两岸激发（纵测线）或上、下游水中激发（非纵测线）方式；不便于布置水上接收排列时，可采用两岸接收、水上逐点激发的方式。

当布置横河方向地震剖面采用相遇观测系统时，应考虑是否具有探测任务所需要的相遇段。

当布置横河方向地震剖面采用上、下游激发的非纵测线接收方式时，测线岸边应有露头点或勘探点（已知基岩埋深）。在选择上、下游激发点位置时，应考虑尽量避免旁侧影响。

(3) 进行水上电测深法或地震勘探，应及时测定当时水边线高程和沿测线的水深。

(4) 在峡谷地区探测深厚覆盖层厚度时，应注意旁侧影响。难以布置面积性探测的测区，可适当布置剖面性探测。

(5) 水声勘探的方法技术见 3.5.3.1~3.5.3.9 条。

(6) 自然伽玛测井、密度测井和井中流体测量的方法技术见

3.7 节中外业工作有关部分。

4.1.6 覆盖层探测资料的推断解释要点

覆盖层探测的资料整理除按 3.1、3.2、3.5、3.7 节中的内业工作规定进行外，在解释推断时应注意以下各点：

(1) 利用钻孔、露头物性测定资料和孔旁电测深、地震剖面资料，分析研究物性层与地质层的关系，物性界面与地质界面是否吻合。在物性层与地质层不一致时，应以物性层厚度确定物性参数，并在成果报告中加以说明。

(2) 根据钻孔与露头物性测定资料、地面物探资料和有关地质资料，分析研究物性参数在水平方向有无变化及其变化规律，以便确定分区采用不同的物性参数或采用渐变内插的物性参数进行定量解释。

(3) 应注意在窄河谷、厚覆盖层的探测工作中，旁侧面基岩对靠近岸边电测深点和地震剖面的影响，它往往使解释的覆盖层厚度偏小。

(4) 根据测井、孔旁电测深和地质剖面资料，分析研究物探解释的覆盖层厚度是否包括基岩风化层在内，并在成果报告中加以说明。

(5) 当基岩物性参数与覆盖层物性参数差不多，而又缺少钻探资料时，应注意避免发生把某些基岩层当作覆盖层或把某些覆盖层当作基岩的定性错误。必要时应及时建议布置钻孔，配合物探解释，或绘制两种界面深度的物性—地质剖面图，与地质人员共同分析研究加以选用。

4.1.7 探测覆盖层应提交的主要图件有物探—地质剖面图、覆盖层等厚度图、基岩面等高线图、综合测井曲线解释图。当有条件进行覆盖层分层时，可绘制某层等厚度图和层面等高线图。

4.1.8 探测覆盖层的精度要求。在测区内具备电法和地震勘探的有利条件又有少量钻孔可被利用的情况下，物探结果与钻探结果比较，总体来说，当覆盖层厚度大于 10m 时，深度误差应小于 15%，物探地质条件较差的测区，误差一般不应大于 20%。

在水声勘探中，水的深度大于 5m 时，深度误差应小于 5%，水底以下覆盖层不存在粗砂和卵砾石的情况下，基岩埋藏深度的相对误差应小于 10%。

4.2 隐伏构造破碎带的探测

4.2.1 隐伏构造破碎带地质—物性特点

(1) 探测隐伏构造破碎带是指应用地面物探方法探测覆盖层以下的断层破碎带。按断层带两盘岩性划分，通常有以下几种情况：

两盘为同一岩性的断层破碎带。

上、下盘为相同岩性，但基岩面有一定高差的断层破碎带。

上、下盘为不同岩性的断层破碎带。

(2) 各种构造破碎带大都有断层泥、糜棱岩和破碎、充水等特征。

(3) 断层破碎带在物性上常表现为低波速、低电阻率、低密度，并容易产生极化率、自然电位、甚低频磁电参数和放射性等物性异常。

4.2.2 隐伏构造破碎带的探测内容：与水电工程稳定性有关的区域性大断层、坝址区及水工建筑物区的主要断层破碎带位置、规模、分布和延伸情况，以及工民建地基勘察中的隐伏构造破碎带的探测。

4.2.3 探测隐伏构造破碎带的物探方法有：地震勘探、电法勘探中的电阻率法、激电法、充电法、自然电场法和甚低频法，放射性勘探中的 α 卡法和微重力探测等。

由于隐伏构造破碎带存在着复杂的地质情况，各种物探方法的应用效果会有很大的差异，需要通过试验工作确定。但应本着先简后繁、综合应用的原则安排生产。

4.2.4 测网布置原则，除按外业工作技术的有关规定外，对坝址、水工建筑物等重点地区，应在低阻、低速异常带和其他物性异常点附近，加密测网和补充必要的工作。测线一般要延长至断

层带以外，以取得完整的异常曲线。

电探布极和地震排列方向，通常沿地形等高线、顺山坡或顺河布置，以减少表层物性不均和地形起伏的影响。

4.2.5 隐伏构造破碎带探测的方法技术：

电法探测

(1) 用电阻率法探测隐伏破碎带的低阻异常时，常采用联合剖面法，电极距的大小可通过试验选择，通常取 $AO = BO = 5 \sim 10H$ ， MN 等于点距或 2 倍点距。

在电剖面工作的基础上再布置电测深或环形电测深，利用测深结果，分析推断构造破碎带空间分布。

(2) 用激发极化法探测隐伏构造破碎带是基于激电参数的激发比 (J_s)、极化率 (η_s)、衰减度 (D_s) 和半衰时 ($\tau_{0.5}$) 与构造破碎带中富集的地下水有着密切关系。

一般可根据测区大小采用电阻率法与激电法相结合的探测方式，或在激电剖面法扫面的基础上，选择异常段（点）布置激电测深了解构造破碎带空间分布。

(3) 当断层破碎带已被钻孔揭露且与围岩有显著的电性差异时，可采用充电法测试断层走向。

(4) 当构造破碎带的地下水活动，产生过滤电场而形成明显自电异常时，可采用自然电场法探测。

(5) 甚低频法主要用于探测低阻地质体，对于含水的构造破碎带一般具有探测效果。它不需要建立场源，装置轻便、生产效率高，适于探测山区覆土厚度不大的断层破碎带。在规划阶段可采用此法进行普查。

地震法探测

(1) 浅层地震折射法通常采用纵测线连续对比观测系统，有时辅以横测线。为便于振幅对比，宜使用相同的增益，扫描尺寸，点距通常为 5m。当利用波的动力学特征为主探测断层破碎带的位置时，点距可减小至 2m 左右。

浅层地震折射法能探测构造破碎带的最小宽度（包括影响

带)一般为2~3m。当覆盖层厚度小于20m时,能探测的最小宽度为3~5m;当其厚度大于20m时,能探测的宽度一般为覆盖层厚度的四分之一。

(2) 浅层反射法较适宜于探测具有垂直断距,上、下盘岩面有一定高差的断层。通常可采用水平多次叠加或共偏移剖面的观测系统,点距一般为2~3m,最大为5m。根据时间剖面或等偏移剖面资料,通过对比标准层同相轴的变化规律,可确定断层的位置。

在表层比较均匀,覆盖层厚度小于20m时,浅层反射法有可能探出上、下盘岩面高差大于4m的断层。

放射性探测

(1) 放射性探测隐伏断层破碎带的方法,目前常用的有地面氡气法、伽玛射线和 α 卡法。

(2) 一般情况下,断层破碎带具有较好的透气性和渗水性,因此地层中的铀、钍、镭放射元素,在衰变过程中释放出放射性气体沿断裂带上升到地表,形成局部放射性物质富集,通过测定可达到寻找隐伏构造破碎带的目的。由于这类放射性异常比较微弱,通常只有正常值的1.1~2.0倍。因此,要求有灵敏度高、稳定性好,并能测量伽玛射线丰富的低能部分(24~266keV)的仪器。

(3) 此法装置轻便、生产效率高,适于山区覆土厚度不大(<10m)的断层破碎带的调查。在规划阶段可采用此法进行普查。

微重力探测

目前高精度的重力仪精度已达1~2 μ Gal。由于断层带和两侧围岩存在着密度差,为应用微重力探测提供了可能。

4.2.6 隐伏构造破碎带探测资料解释推断要点

(1) 根据联合剖面平面图,由低阻正交点异常轴走向推断构造破裂带的走向和平面位置。由联合剖面曲线的对称性和双重剖面曲线正交点的偏移判断构造破碎带的倾向。

(2) 实践表明: $J_s=0.3\%\sim 3\%$ 、 $\eta_s=1\%\sim 5\%$ 、 $D_s=30\%$

~80%时，一般是含水的反映；而大于上述范围值时，一般与碳质岩层及金属矿体等干扰因素有关。因此，分析判断时要结合区域地质、水文地质和其他物探资料综合解释。

(3) 断层带由于破碎、夹泥、充水会出现低波速段，一般可把波速下降 30% 以上的地段视为低速段。根据低速段出现的折射波振幅衰减、视周期增大和波形变化等动力学特点来解释低速段，有助于排除诸如深切河槽、V 形河谷以及坡度大于 20° 等折射界面急剧起伏造成的低速段。由低速段的分布规律可求出构造破碎带的走向、埋深和大致的宽度（当埋深大于 10m 时应进行偏斜校正），但不能判断其产状。对于小的断层破碎带，低速段特征往往不明显，若工作布置合理，根据波形变化，振幅衰减或波的置换现象，有时可判断宽度为 2~3m 的断层破碎带。

(4) 当覆盖层厚度不大（<10m），自然电场、激电参数、放射性强度、甚低频磁电参数在地面产生的物性异常大于正常场 1.5~3 倍时，采用以上方法进行探测，有可能得到断层带的异常反映。

(5) 对异常作地质解释时，要掌握测区地质构造规律，追索异常的资料要完整，有不同极距的对比资料，有一定数量的控制测深点和电参数，对地形、旁侧等非地质因素的影响应有足够认识。

4.2.7 探测隐伏构造破碎带应提交的物探成果图件：

(1) 物探—地质剖面图。

(2) 物探剖面平面图。

(3) 物探成果平面图，以反映断层平面分布位置为主，辅以地质资料和物探工作布置。

4.2.8 探测隐伏构造破碎带的精度要求。当测区内存在有利地形及物探条件时，采用综合物探方法调查隐伏构造破碎带的地质效果是：当覆盖层厚度小于 10m 时，应能查明 2~3m 宽度的断层破碎带；当覆盖层厚度 10~20m 时，应能查明 3~5m 宽度的断层破碎带；当覆盖层厚度大于 20m 时，应能查明宽度为覆盖层厚度 1/4 的断层破碎带。

4.3 岩溶探测

4.3.1 岩溶的地质—物性特点

岩溶的形成与发育，主要与地层岩性、地质构造和地下水活动等因素有关。岩溶经常形成于厚层块状可溶性的纯灰岩地层，多沿岩层层面或断层破碎带发育成溶洞，当地表水和地下水活动愈剧烈，水量愈大时，岩溶发育就愈强烈。

岩溶洞穴与其围岩之间，一般存在着明显的电阻率、波速、波阻抗、密度、磁化率及散热率等物性差异，可应用相应的物探方法进行综合物探探测。

4.3.2 岩溶的探测内容

(1) 探测岩溶地区（碳酸盐岩分布区）坝址与厂房等重要建筑物基础以及库区岩溶洞穴的分布。

(2) 当具备可测钻孔条件时，利用孔间的穿透方法，探测孔间岩溶洞穴的空间分布。

(3) 当有平洞时，应用洞壁的测试方法，探测洞间或洞壁围岩一定深度范围内的岩溶洞穴的空间分布。

(4) 在被覆盖的岩溶地区，当地形平缓、基岩埋藏较浅时，可应用地面物探方法，探测表层岩溶溶蚀带。

4.3.3 岩溶探测的物探方法

(1) 调查表层岩溶的地面物探方法较多，主要有：电法，包括直流电法（电测深与电剖面）、电磁法（甚低频法与频率测深）及激发极化法（时间域与频率域）；微重力法；地震法（浅层折射波法和浅层反射波法）；地温法等。

(2) 探测孔间岩溶的井中物探方法有：钻孔电磁波透视法、声波透视法和地震波透视法。

(3) 探测洞间和洞壁岩溶的地下物探方法，可应用钻孔电磁波透视法，声波透视法及地震波透视法探测洞间岩溶；应用地质雷达探测和微重力勘探洞壁岩溶。

(4) 在地表或水下调查地下暗河的出露点，主要应用地温

法，测量地表、地下水及河水的温度，可以查找地下暗河在地表或在河水中出露点。

4.3.4 探测岩溶的测网布置

(1) 探测表层岩溶时，测线布置方向，应尽量垂直于岩溶发育带的走向。布置测线应尽量与其它勘探线或有已知资料的地段重合。各种物探方法的测线，也应尽量相互重合，以利综合分析解释推断。

(2) 测网密度主要根据任务要求和溶洞大小与埋深等因素，综合研究决定。

4.3.5 岩溶的探测技术

(1) 应用各种物探方法探测岩溶均具有一定的局限性，尤其是利用地面物探方法时，受各种干扰因素较多。物探工作主要受地形起伏变化、覆盖的厚薄、溶洞体积的大小及其埋藏的深浅等因素的影响。确定物探可工作的条件，一般应以岩溶异常值大于正常场观测均方误差的 3 倍为下限值。为克服物探资料的多解性，工作中应尽量选择相应的综合物探方法。

(2) 探测表层岩溶溶蚀带，当地形平缓时，一般应用常规物探方法，如直流电法（电测深和电剖面）、地震法（浅层折射波法和浅层反射波法）及微重力法等综合物探方法。当地形起伏不大时，除应用常规物探方法外，还可采用受地形影响小的物探方法，如甚低频、频率测深、声频电场法等。由于灰岩和溶蚀带的顶面往往起伏较大，其埋深的解释结果一般是基岩起伏的平均值。

(3) 探测岩溶洞穴是充水还是填充疏松沉积物时，可采用激发极化法与其他物探方法相互配合。

(4) 应用井中同位素流速仪测定地下水流速流向和采用红外测温仪测量地下水的温度，可为确定地下暗河的出露点提供定性资料。

(5) 探测孔间岩溶洞穴，应用孔间的透视法时，钻孔之间的距离应小于 80m，工作结果可给出孔间岩溶空间分布的定量成果。

4.3.6 岩溶探测资料的解释推断要点

(1) 电法探测时, 溶洞与围岩相比, 呈现高阻特征; 对于充水或填充疏松沉积物的溶洞与围岩相比, 则表现低阻特征。利用激发极化法的激电常数的变化, 可区分溶洞的填充物。当 $J_s > 30\%$ 、 $D_s > 80\%$ 、 $\eta_s > 5\%$ 时, 一般为沉积物反映; 低于上述数值时, 往往是水的反映。但由于不同地区有不同背景值, 因此, 可根据测区试验对比确定具体判别标准。

(2) 地震法探测时, 由于溶洞与围岩之间存在着明显的波阻抗差异, 在溶洞的顶部通常可形成反射面, 可以接收到溶洞顶板的反射波, 判断具有一定范围的溶洞。而在溶洞两侧则追踪不到相应的反射波。由于溶洞的屏蔽作用, 也接收不到溶洞底部的反射波。

(3) 重力法勘探时, 岩溶洞呈现重力负异常, 其异常值的大小与溶洞的大小、形状、埋深及密度差等因素有关。测点高程的测量误差应小于 3mm, 以避免因高程测量误差造成假异常。

(4) 应用地温法观测地下暗河出口处的水温, 一般可高于河水温度 $1.3 \sim 1.9^\circ\text{C}$, 个别温差达 5°C 以上。此外, 还可根据温差及其分布范围, 定性判断地下水流量的大小, 一般温差愈大, 分布范围愈宽, 地下水的流量也愈大。

(5) 应用透视法圈定孔间岩溶或断层破碎带时, 对于电磁波、声波及地震波等透视法的解释均可采用交会法和层析成像法(由计算机进行数据处理)。应用电磁波透视法进行浅孔观测时, 应注意分析地层界面与地表—空气界面干扰的影响。

4.3.7 岩溶探测应提供的主要图件有: 物探工作布置图; 物性—地质平面图; 物性—地质剖面图; 钻孔电磁波透视剖面图等。

4.3.8 岩溶探测的精度要求

(1) 应用钻孔电磁波透视法探测孔间岩溶洞穴时, 可进行定量解释, 确定孔间断面上岩溶洞穴的几何形状。当两钻孔间距小于 80m 时, 确定直径 2m 以上的岩溶洞穴的有效率应不低于 80%。

(2) 在覆盖较薄和地形平缓时, 探测表层岩溶溶蚀带顶面埋深的精度应不低于 80%。

4.4 水文地质调查及水文地质参数的测定

4.4.1 含水层和渗漏带的地质—物性特点

(1) 含水层的地质—物性特点可分为两类：一是第四纪地层中的含水层主要是孔隙率大、透水性强的砂卵（砾）石层、砂层。它们与透水性弱的粘性土层相比，一般具有电阻率高、电化学活动性强、自然放射性强度小等物性特点；二是基岩中有裂隙带、岩溶发育带、断层破碎带等含水层（带）。基岩含水层（带）与其围岩相比，通常具有电阻率低、电化学活动性强、弹性波速度低、自然放射性强度存在差异等特征。

(2) 渗漏带是具备良好的地下水活动条件的地带。当它们与水源连通时，将成为含水层（带）或水库渗漏的途径，其地质—物性特点与含水层相似，但当它们不充水时，则没有电化学活动性强的特点。

4.4.2 应用物探方法进行水文地质调查的内容包括：在第四系地层中划分含水层和隔水层，测定其深度和厚度；进行基岩裂隙（或岩溶）水资源调查；测定地下水的水位、分水岭、补给关系及咸淡水界线；探查水库渗漏途径等。

水文地质参数测定主要是测定地下水的流向、流速和渗透速度，在条件有利时配合水文地质试验测定含水层涌水量、渗透系数、了解地层的渗透性。

4.4.3 应用物探进行水文地质调查时，必须与水文地质测绘和水文地质钻探、试验工作紧密结合，并根据调查地区情况，因地制宜地选用或综合应用物探方法。在第四系地层中探测含水层，一般应按覆盖层探测的方法和技术进行；在基岩中进行水文地质调查时，应按断层破碎带的探测方法和技术进行；在岩溶发育地区应使用岩溶调查的方法技术。具体做法可参见 4.1.3、4.1.6、4.2.3、4.3.6 条。对于具有地下水赋存条件的地层是否含水，则主要应用激发极化法探测。

测定水文地质参数的物探方法有：充电法、自然电场法、井

液电阻率测井、流量测井、同位素示踪法和同位素流速仪法。

4.4.4 面积性水文地质调查的物探测网，一般宜按方格状布置。对于地质情况已掌握的地区，也可在水文地质工作的基础上，仅对重点地段和可疑地段布置若干物探剖面。各种方法的测网密度应按照第3章中的相应规定。

4.4.5 水文地质调查和参数测定的方法技术

(1) 含水层和隔水层的深度、厚度和地下水位的测定：通常采用电测深法和地震法。对第四纪含水层和裂隙、断层破碎带、岩溶发育地段的富水性估计，应根据当地的水文地质条件，即地下水位、地形条件、地下水的补给来源等综合分析，并找出该地区地层富水性与激发极化法测得的激发比 J_s 、极化率 η_s 、衰减度 D_s 的数值之间的定性规律后才能进行。

(2) 地下水流向、流速的测定：

采用自然电场法：可在测区内地形比较平缓的地方布置若干测点，以测点为中心作自然电场的环形观测，即测量不同方位的过滤电场，则电位差最大的正电位方向为该测点地下水的流向。

在井内用同位素流速仪测定流向。有多个钻孔时可用同位素示踪法测定流向流速。

在钻孔和水井内，采用充电法进行地下水流向流速的测定。充电法观测到的等位圈移动速度最大方向为地下水的流向，当测量等位圈的固定电极定在上游方向时，则地下水流速按下式计算：

$$v = \Delta R_i / \Delta t_i \quad (4.4.5-1)$$

式中 v ——地下水流速；

ΔR_i ——地下水流向上等位圈的位移量；

Δt_i ——两次等位圈观察的时间间隔。

在斜坡上进行充电法工作时，还应将上式结果作地形校正，其校正公式为：

$$v_j = v / \cos \beta \quad (4.4.5-2)$$

式中 v_j ——地形校正后的地下水流速；

β ——地形坡度。

(3) 地下水分水岭和补给关系的调查，主要应根据自然电场法、充电法测定的地下水流向及电测深法、地震法测定的地下水位资料，结合地质资料综合分析来进行。

(4) 第四纪地下水的咸水与淡水在水平面上的分布情况，主要依靠电阻率法来了解。多层地下含水层中咸水、淡水界线的划分应依靠在钻孔内进行电阻率、自然电位和井液电阻率测井。

(5) 地下水渗透速度测定，可在钻孔中用井液电阻率法中的扩散法或用同位素流速仪。当钻孔穿过了具有不同压力的几个含水层时，可利用井中流量计或扩散法测定含水层之间的补给关系。

(6) 涌水量和渗透系数测定，应在钻孔进行抽水或压水试验（或进行注入法、提捞法）时，利用井中流量计或井液电阻率法测量孔内不同深度点的轴向流量，从而计算出各含水层的涌水量（或渗漏段的透水率）和渗透系数。

(7) 探查水库渗漏途径，主要是找出水库的库底、库岸和堤坝中的渗透层、裂隙破碎带、断层和洞穴，因此，可参照 4.1、4.2、4.3 节的规定执行。此外，还可在地面或水上进行自然电位测量，等自然电位平面图上的负异常多为渗漏地带的反应。

4.4.6 水文地质调查结果应提交地质—物性剖面图，在水文地质平面图上标出物探推断的富水地带、渗漏带和地下水流向；有咸水的地区还应标出咸、淡水的分界线。

水文地质参数测定应提交水文测井曲线解释成果图及测定地下水流速、流向、渗透速度和渗透系数的计算成果图表。

4.4.7 应用地面物探进行水文地质调查，当测区的地质—物性条件有利于物探工作时，测定含水层、隔水层深度和地下水位的深度误差，一般应小于 20%，而在钻孔中用测井方法测定的深度误差则应小于 1%。

4.5 基岩风化层的探测

4.5.1 基岩风化层的地质—物性特点

(1) 根据基岩风化程度的不同，一般可将风化层分为全风化、强风化、弱风化和微风化四带。各风化带间，下层的波速、电阻率和密度一般都大于上层。多数情况下基岩风化层存在着 2~3 个速度界面或电性界面。这些物性界面常与全风化、强风化和弱风化界面相一致或相接近。少数情况下风化层在波速或电性上呈渐变关系。

(2) 通常，全风化带在波速或电性上与覆盖层差异较小，容易造成两者混淆。

(3) 基岩风化厚度和风化程度受岩性和断层破碎带、卸荷裂隙带等的影响，同一测区不同地段的风化厚度有时变化较大。因此，探测基岩风化层时要同时查明断层破碎带、卸荷裂隙带的分布和岩性界面的位置，以便了解风化层的变化规律。

4.5.2 基岩风化层的探测内容

基岩风化层的探测一般包括坝址区和主要建筑物区的基岩风化程度和风化厚度。

地面物探方法通常只能探测强风化带底界面以上的风化层总厚度，条件有利时（各风化层具有电性和波速差别）也可能进行风化层分带。

在钻孔和平洞中可进行较详细的风化分带。

4.5.3 探测基岩风化层的物探方法

(1) 探测基岩风化层的主要地面物探方法有初至折射波法和电测深法。辅助方法有浅层反射波法和对称四极电剖面法。

(2) 钻孔中探测风化带的方法，在无套管时，主要使用电阻率测井和声波波速测井；有套管时主要使用地震波速测井（地面激发孔中接收）和放射性测井。

(3) 平洞内探测风化带的主要方法有声波法和地震波法。

4.5.4 探测基岩风化层的测网布置

探测基岩风化层的测网布置方法与探测覆盖层的测网布置方法基本相同。一般是平行或沿主要勘探线或建筑物轴线布置。在风化深度变化较大的地段应适当加密测网。进行折射波法或电剖

面法了解岩性、断层风化带的影响，可适当布置几条与岩层界线或断层走向相垂直的辅助测线。

4.5.5 基岩风化层的探测技术

(1) 电测深法一般采用对称四极测深，河床部分可采用三极测深。在河床和阶地上探测时，宜顺河流方向跑极；在山坡探测时，宜平行等高线或顺山坡跑极。探测深风化带时，应进行一定数量的十字测深或环形测深，以了解深风化带的分布形态。

(2) 初至折射波法应采用多重观测系统，炮间距要通过现场试验确定，并尽可能满足连续追踪几个地质界面的需要。横河向地震剖面，应尽量使整个排列布置在同一地貌单元内。

当覆盖层较厚时（如大于 30m 时），可考虑试用浅层反射波法。工作方法包括展开排列，共深度点叠加或等偏移排列。

(3) 平洞地震波测量及平洞声波测试技术见 3.6 节弹性波测试。

(4) 电阻率测井、声波测井及放射性测井技术要求见 3.7 节测井。

4.5.6 基岩风化层探测资料的解释推断要点

(1) 分析风化层的变化规律时，应充分考虑岩性、断层破碎带、卸荷裂隙带等因素的影响。

(2) 根据折射波时距曲线斜率的变化规律以及电测深曲线的特征，一般可确定物性界面与风化层的对应关系。

当风化层成层状分布时，可采用 t_0 法、表层剥去法或时间场法求风化层厚度。当测区有一定数量的坑、孔资料时，应通过坑、孔资料的对比分析，确定物性界面与地质界面是否一致。

当风化层的波速呈渐变时（在垂直方向上），应找出波速随深度的变化规律。一般可建立 $v=v_0(1+kZ)$ 关系式（ v 为基岩顶板下 Z 处的波速， v_0 为基岩顶板处的波速， k 为波速变化率），采用回折法解释。

关于基岩微风化、弱风化（中等风化）、强风化和全风化的风化系数 F 的划分标准，按《水利水电工程地质勘察规范

(SDJ14—78)》执行。

4.5.7 探测基岩风化层应提交的主要图件

探测基岩风化层应提交的主要图件有物探工作布置图和地质—物探剖面图。对地质—物性条件比较好的面积性探测工作还应提交基岩风化层等高线图或等厚度图（并注明强或弱风化带底界面以上的风化层厚度）。

4.5.8 探测基岩风化层的精度要求

当测区地形、地质—物性条件比较有利，同时又有少量的钻孔资料可以利用时，地面物探结果与钻孔结果相比，深度误差一般应小于 20%（破碎带上除外）；当无钻孔资料可利用或测区地形、地质—物性条件较差时，深度误差一般应小于 30%（破碎带上除外）。

4.6 滑坡体探测

4.6.1 滑坡体的地质—物性特点

（1）工程地质上依据滑坡体组成物的不同，一般将滑坡分为土层滑坡和岩石滑坡两大类。

滑坡体在滑动过程中常使其岩土结构受到不同程度的破坏，产生大小不等的裂隙，从而使滑坡体的波速降低、电阻率减小。滑坡体的波速和电阻率一般比滑动面以下的岩（土）体低，因此，滑动面常常成为速度界面或电性界面。

通常以基岩面为滑动面的土层滑坡和以断层面（或风化界面）为滑动面的岩石滑坡体与滑床之间的物性差异较大。以不同成因的土层界面为滑动面的土层滑坡和以软弱夹层为滑动面的岩石滑坡体与滑床之间的物性差异较小。

（2）滑坡体通常为不均匀的地质体，一般上部裂隙发育，波速较低；下部裂隙较少，波速升高。滑坡体内常形成 1~2 个波速界面或电性界面。滑坡体的波速和电阻率在水平方向和垂直方向往往变化较大，并易造成电测深曲线的畸变。

4.6.2 滑坡体的探测内容

滑坡体探测内容一般包括滑坡体的分布范围和厚度，当有钻孔可利用时，还应进行测井，以获得地面物探资料解释所需的波速和电阻率参数。

4.6.3 探测滑坡体的物探方法

探测滑坡体的主要地面物探方法有初至折射法和电测深法。辅助方法有浅层反射波法和对称四极电剖面法。

测井方法主要有地震测井、声速测井和电阻率测井。

4.6.4 探测滑坡体的测网布置

滑坡体探测常采用网格状或扇形状测网。一般顺山坡向或平行河流（或等高线）布置若干条测线，测线长度应延伸至滑坡体外一定距离处。当测区的坡度较陡，且滑坡体范围狭窄时，测网布置应视具体情况而定。

4.6.5 探测滑坡体的技术

（1）初至折射法宜采用多重观测系统。当滑坡体内激发条件较差时，一般可将大相遇端炮点置于滑坡体外侧，但要防止出现穿透现象。对于平行河流的测线，也可采用横测线观测系统，并将炮点置于江（河）中。

（2）当滑坡体较厚时（大于 30m），可采用浅层反射波法。工作方法包括展开排列和共深度点叠加或等偏移排列。一般采用锤击或小药包作震源，使用高频检波器接收。

（3）电测深宜采用温奈尔装置，沿等高线或山坡跑极，以避免电测深曲线脱节和减少地形影响。电剖面宜采用对称四极装置。

（4）地震测井和声速测井、电阻率测井技术见 3.6、3.7 节。

4.6.6 滑坡体探测资料的解释推断要点

滑坡体探测资料的解释推断应注意以下几点：

（1）一般使用 t_0 法、表层剥去法或时间场法计算滑坡体厚度，所采用的计算参数应充分利用钻孔和竖井进行测定，以获得较可靠的波速资料。

当滑坡体水平方向波速变化比较大时（50m 范围内的波速变化大于 20%），应根据实测的有效速度沿测线分布图确定各检波

点的有效速度。

(2) 滑动面倾角较大时, 应通过作图法将检波点的法线深度换成铅直深度, 以便使用。

(3) 滑坡体边界一般可根据 $t_0(x)$ 值增大和上伏层有效速度的变化, 以及对称四极剖面 ρ_s 曲线跃变段位置并结合地貌特征确定。

4.6.7 探测滑坡体应提交的主要图件

探测滑坡体应提交的主要图件有: 物探工作布置图、滑坡体物性—地质纵、横剖面图和滑坡体等厚度图。

4.6.8 探测滑坡体的精度要求

探测滑坡体精度要求, 在条件有利时, 深度误差一般应小于 20%; 条件不利时, 深度误差应小于 30%。

4.7 软弱夹层的探测

4.7.1 软弱夹层的地质—物性特点

软弱夹层是指在力学强度上要比上下层低得多的地层。它们在物性上往往具有电阻率低、自然伽玛强度高、渗透性较差、声波速度和密度较低的特性。

4.7.2 软弱夹层探测的内容

软弱夹层探测是指在钻孔中测定砂砾石层中夹的土层(包括淤泥、粘土)和基岩中的泥化夹层等的位置及其厚度。

4.7.3 探测软弱夹层的方法

探测软弱夹层的方法是综合测井。可根据地质—物性条件在视电阻率、微电极系、侧向、屏蔽刷子电极电流测井、自然伽玛、密度、自然电位、声速、超声成像测井和钻孔电视、井径测量等方法中选择几种。不应使用单一方法探测软弱夹层。

被探测的软弱夹层厚度不足 20cm 时, 应采用 1:50 或 1:20 的深度比例尺。测井记录时电缆的升降速度, 除上限应符合 3.7.3.10 要求外, 对薄夹层的探测还应尽量降低速度, 并保持匀速, 不得上下窜动。

4.7.4 砂砾石覆盖层中软弱夹层探测方法的选择

(1) 在泥浆护壁的钻孔中，宜采用自然伽玛测井，侧向或视电阻率测井、自然电位测井三种作为基本方法。

当砂砾石层地下水渗透速度较大时，还应辅以井液电阻率测井中的扩散法。

当夹层与砂砾石层在密度和声波速度上有明显差异时，还可辅以密度测井和超声成像测井。

(2) 钻孔中有套管时，无论孔内是否有水，只能采用自然伽玛测井和密度测井方法，且探测效果较差。要在覆盖层中探测软弱夹层的钻孔应尽量避免使用套管。

4.7.5 基岩中软弱夹层探测方法的选择

(1) 钻孔中需要探测的孔段无套管、有清水时，宜以视电阻率或侧向测井、自然伽玛测井和井径测量、钻孔电视作为基本方法。若软弱夹层很薄，还应采用微电极系或屏蔽刷子电极电流测井。其他方法如密度、声速、超声成像、自然电位测井，应根据测区的具体地质条件和软弱夹层与围岩之间物性的差异，通过试验加以选用。

(2) 需要探测的井段无套管、有泥浆或水质无法澄清时，除不能使用钻孔电视外，测井方法选择与本条(1)款相同。

(3) 需要探测的井段无套管、且为干孔时，宜以自然伽玛测井、钻孔电视和井径测量为基本方法，辅以密度测井。

(4) 需要探测井段有套管时，不论孔内是否有水或泥浆，只能采用自然伽玛测井和密度测井。

4.7.6 软弱夹层探测资料的解释推断

软弱夹层探测资料的解释推断，应进行多种测井曲线之间的分析对比。特别注意在测井曲线的异常中区别开软弱夹层和裂隙、破碎带，两者在电阻率、声速、密度测井曲线上均可能显示低异常，应依靠自然伽玛测井、井径测量和钻孔电视观察等测井资料来加以鉴别。

当工区所测钻孔较多，孔间距较密时，还应注意钻孔之间的

相互对比，尽量避免遗漏软弱夹层或推断错误。

4.7.7 探测软弱夹层应提交的主要图件、成果有：钻孔综合测井成果图和软弱夹层深度、厚度统计表。

4.7.8 探测软弱夹层的精度

各种测井方法对软弱夹层的分辨能力和测量精度是不相同的，可分为以下几类：

(1) 钻孔电视的分辨能力最高。当软弱夹层的色泽或颗粒结构与上下围岩在图像上有明显的差异时，应不遗漏厚度大于 1mm 的夹层，当夹层厚度在 20mm 之内时，测定夹层厚度的误差小于 3mm。

(2) 微电极系测井、屏蔽刷子电极电流测井和超声成像测井对软弱夹层的分辨能力较高。当软弱夹层的电阻率（对微电极系与电流测井）或声学特性（对超声成像测井）与上下围岩有明显差异时，一般应不遗漏厚度大于 5cm 的夹层。采取极低速测量等特殊措施后可不遗漏 3cm 以上的夹层。测定厚度的误差小于 10cm。

(3) 自然伽玛测井、自然电位测井、视电阻率测井、声速和密度测井等方法对软弱夹层的分辨能力属于较低的一类。当软弱夹层的物性与上下围岩之间有明显差异时，采用这类方法的测井结果应不遗漏厚度大于 20cm 的软弱夹层。测定层厚的误差小于 20cm。

上述精度系对基岩中探测软弱夹层，钻孔直径小于 100mm，孔壁比较完整，且夹层倾角小于 30°而言。否则，精度相应降低。

(4) 软弱夹层探测成果中的深度相对误差应小于 5%。

(5) 根据钻孔电视或超声成像测定软弱夹层的产状、倾角误差应小于 5°，倾向误差应小于 20°。

4.8 岩（土）体物理力学参数的测定

4.8.1 应用物探方法测定岩（土）体物理力学参数包括：电阻率、纵波速度、横波速度、密度、干容重和计算泊松比、动弹性模量、动剪切模量、动抗力系数、孔隙度和各向异性系数等。

4.8.2 岩土体物理力学参数测定的地质—物性特点

通常岩（土）体都存在各种不同的物性差异，如电阻率差异、波速差异、密度和孔隙度差异等。因此，可以应用电法、声波、地震、放射性等探测方法予以测定。

4.8.3 测定岩（土）体物理力学参数的物探方法与技术

4.8.3.1 电阻率参数测定，主要采用电测深法和电阻率测井。并可为电站及厂房设计提供计算接地电阻的定量资料。

（1）在有钻孔可利用的情况下，综合应用电测深法和电阻率测井，采取点面结合方式求取岩层电阻率，以提高探测效果。

（2）在钻孔中测定电阻率参数，只能在无套管的情况下进行，主要方法有多侧向测井及横向测井。

（3）基岩电阻率参数可在露头或平洞内采用小四极装置测定。

4.8.3.2 纵横波速参数测定的主要方法有地面地震勘探、地震跨孔原位测试、平洞声波法及地震法测试、声波测井和地震测井等。以上方法可以综合应用或根据地质物探条件分别采用，有关测试结果可为洞室围岩分类及稳定性评价提供参数，为软基基础处理及基础稳定性提供设计依据，以及为判别液化的可能性提供准确的参数。

（1）可采用浅层折射法和浅层反射法，测定覆盖层及基岩的波速，测点及测线布置视具体任务而定。

（2）在探洞、竖井及地下洞室中测定岩体波速时，主要采用声波法及地震法，条件具备时，这两种方法可以综合利用。横波的摄取主要依靠地震法测试。对于风化卸荷带以及宽度不大的断层带、裂隙密集带、软弱夹层，可采用声波内同步法测试，以取得准确和完整的资料。

（3）在有钻孔可利用的工区，应采用声波测井及地震测井测定岩（土）体地基的纵波速度，并可为地面地震勘探提供解释的波速参数。

（4）地震跨孔原位测定纵、横波速度见 3.6 节中的有关要求。

(5) 通过纵、横波速度参数的测定，可进一步提供泊松比、动弹性模量、动剪切模量、岩体完整系数、各向异性系数及单位抗力系数等物理力学参数。

4.8.3.3 密度、干容重参数测定，主要在无套管的基岩钻孔或有套管的砂和砂砾石钻孔中采用密度测井方法进行。基岩孔主要测定地层密度，松散地层孔主要测定地层干容重。密度测井的技术要求见 3.7.3.21 及 3.7.3.22 条。

4.8.3.4 孔隙度参数的测定：以声波测井和密度测井为主，其次为电阻率测井。通常采用声波测井、密度测井和电阻率测井的综合测井方法，可以取得较好的效果。具体技术要求见 3.7 节中的有关部分。

4.8.4 岩（土）体物理力学参数测定的成果分析与计算

4.8.4.1 电阻率参数的计算参照附录 C 有关部分。

4.8.4.2 根据纵、横波传播速度和密度测井测定的密度（或根据该工区密度试验资料），按以下公式计算泊松比（ μ ）、动弹性模量（ E_d ）、动剪切模量（ G_d ）和单位抗力系数（ K_o ）。

(1) 泊松比：

$$\mu = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (4.8.4-1)$$

(2) 动弹性模量：

$$E_d = v_p^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (4.8.4-2)$$

$$E_d = 2v_s^2 \rho (1+\mu) \quad (4.8.4-3)$$

(3) 动剪切模量：

$$G_d = v_s^2 \rho \quad (4.8.4-4)$$

(4) 单位抗力系数：

$$K_o = \frac{E_d}{100(1+\mu)} \cdot a \quad (4.8.4-5)$$

上 5 式中 E_d ——动弹性模量；

G_d ——动剪切模量；

K_0 ——单位抗力系数；

v_p ——纵波速度；

v_s ——横波速度；

ρ ——介质密度；

a ——折减系数。

(5) 各向异性系数，在具有片理、层理或似层状结构面的岩体内，当沿不同方向测试时（如平行结构面、垂直结构面），弹性波传播速度将产生较大的差异，这种差异可用各向异性系数表示。对于均质的、各向同性的岩体，各向异性系数 η 值等于或接近等于 1。平行岩体结构面的纵波速度 v_p'' 与垂直岩体结构面方向的纵波速度 v_p^\perp 之比值可能最大，一般称之为最大各向异性系数，计算公式为：

$$\eta = \frac{v_p''}{v_p^\perp} \quad (4.8.4-6)$$

4.8.4.3 孔隙度参数的计算：

(1) 利用声速测井求孔隙度：

通常采用所谓“时间平均公式”表示：

$$\frac{1}{v} = \frac{\phi}{v_f} + \frac{(1-\phi)}{v_{ma}} \quad (4.8.4-7)$$

式中 v ——实测地层声波传播速度；

v_f ——地层水的声波传播速度；

v_{ma} ——岩石骨架的声波传播速度；

ϕ ——地层孔隙度。

如以速度 v 的倒数（传播时间 Δt ）表示，则上式可写成：

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (4.8.4-8)$$

式中 Δt 、 Δt_{ma} 、 Δt_f ——分别表示声波在整个岩石、岩石骨架和孔隙地层水中每传播 1m 距离所需要的时间。

(2) 利用密度测井求孔隙度：

密度测井是确定孔隙度的另一有效方法。对于充水的地层，只要已知岩石骨架的密度和地层水的密度即可求出孔隙度。

对于孔隙中充水的地层其体积密度 ρ_b 与孔隙度 ϕ ，孔隙中水的密度 ρ_f ，以及岩石骨架密度 ρ_{ma} 具有如下关系：

$$\rho_b = \phi \rho_f + (1 - \phi) \rho_{ma} \quad (4.8.4-9)$$

求得
$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \quad (4.8.4-10)$$

其中地层体积密度 ρ_b 由密度测井曲线求出（仪器需经过标定）， ρ_{ma} 值视不同岩石结构而异，一般在 2.7g/cm^3 左右，如砂岩取 2.65g/cm^3 ，石灰岩、白云岩取 $2.70\sim 2.90\text{g/cm}^3$ 。

(3) 利用视电阻率测井求孔隙度：

利用视电阻率测井求孔隙度，由于其影响因素比较复杂，精度相应地要差些，一般只能给出估计值。

地层电阻率 (ρ_t) 和孔隙中水的电阻率 (ρ_w) 之比值与岩石孔隙度 (ϕ) 存在如下关系：

$$F = \frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (4.8.4-11)$$

比值 F 为相对电阻率，或称地层因素。 a 和 m 为岩石和胶结程度有关的系数，根据经验，孔隙度较高的松散砂层 $a=0.62$ ， $m=2.15$ （或 $a=0.81$ 、 $m=2$ ）；石灰岩 $a=1$ ， $m=2\sim 2.5$ ；对于裂隙发育的石灰岩 $a=1$ 、 $m=1.12\sim 1.30$ 。

4.8.5 弹性波测试成果的解释与整理

弹性波测试成果的解释与整理，除按 3.6 节中的规定执行外，应注意以下几点。

(1) 确定一个工区岩块（石）的纵波速度 v_{pr} ，用以评价岩体完整性系数 K_v ；岩块的纵波速度可选择本工区完整的岩样（或岩芯）用声波仪测定。一个工区只有一种岩体时，只能采用一个 v_{pr} 值，并与波速分类一致。如本区有二种以上岩性时，可以采用不同的 v_{pr} 值，但必须按不同岩性的各项指标进行分类。

(2) 岩体完整性系数 (K_v) 的计算式：

$$K_v = \left(\frac{v_{pm}}{v_{pr}} \right)^2 \quad (4.8.5)$$

式中 v_{pm} ——岩体纵波速度；
 v_{pr} ——岩块纵波速度。

式 4.8.5 反映岩体相对于岩块的破碎程度。岩体完整系数的分类参见表 4.8.5。

表 4.8.5 岩体完整系数的分类

岩体完整性程度	完 整	较 完 整	完整性差	破 碎
K_v	1~0.75	0.75~0.45	0.45~0.2	<0.2

(3) 地下洞室弹性波测试综合成果图可参阅附录 F 有关图式绘制。

4.8.6 岩土体物理力学参数测定应提交的主要图件及成果

(1) 电阻率参数测定应提交的图表有：电阻率参数平面分布图、钻孔电阻率测井曲线，电阻率参数成果表。

(2) 岩体弹性波测试，可根据需要提供：纵横波速度、泊松比、弹性模量、剪切模量、抗力系数等成果表，洞室弹性波（或声波）测试综合成果图（图的内容包括波速、岩体完整性系数、弹性模量等主要曲线，并与地质素描图相对应）。

(3) 钻孔波速、弹模成果图及成果表（成果图应有测时或时差曲线，并与钻孔地质柱状图相对应）。

(4) 钻孔密度、孔隙度成果图、成果表（成果图应有声波测井、密度测井或电阻率测井曲线，并与钻孔地质柱状图相对应）。

4.9 地下洞室围岩及地基岩体质量检测

4.9.1 地下洞室围岩及地基岩体质量检测，主要包括洞室松弛带的测定，坝基施工检测，固结灌浆、帷幕灌浆效果的检查及地基检测等。

洞室松弛带的测定

4.9.2 洞室松弛带的地质—物性特点

(1) 洞室在掘进过程中容易形成洞壁岩面的松动，洞室形成后应力又将重新分布，并在洞室围岩表层产生应力下降带或应力集中带。

(2) 洞壁围岩一般存在三个区带，即应力下降带、应力上升带和原岩应力带，这三个区带具有明显的或渐变的波速界面。

4.9.3 洞室松弛带测定的方法技术

(1) 主要在洞室横断面上布置风钻孔进行声波法测试，可采用单孔一发双收换能器，也可采用双孔发射—接收换能器，具体测试技术详见 3.6 节中的有关规定。

(2) 测试断面的测孔布置，一般为 5 孔（分顶孔、角孔、边墙孔，对于大跨度、高边墙的洞室可增加顶孔和边墙孔），测孔深度与洞径和围岩地质情况有关，孔深一般为 3~5m，应以能够反映原岩应力为准。

(3) 当洞壁围岩的松动层与完整岩石（原岩）具有明显的波速差别，可采用小相遇地震初至折射法作为辅助方法。

4.9.4 洞室松弛带测定成果的分析

用声波法测定松弛带依据围岩不同性质的各带具有不同的声波速度层。应力下降带表现为相对的低速区（包括爆破和开挖引起的松弛），应力上升带则为高速区。根据实测围岩不同的波速层，可划定松弛带的范围和形状。

洞室围岩松弛带测定的波速随钻孔深度变化曲线，大致有以下几种类型，如图 4.9.4。

(1) 图 4.9.4 (a) 所示，可划分出应力上升带和不受开挖影响的原始应力带。洞壁附近波速减低，反映了表层岩体松弛，随着深度增加，出现了波速增高，这是洞室四周的应力集中区，波速的增高表明该区岩体完整，应力集中显著。

(2) 图 4.9.4 (b) 所示，当洞径较小且四周岩体完整坚硬时，洞壁只有弹性形变，出现应力集中现象，无松弛区。

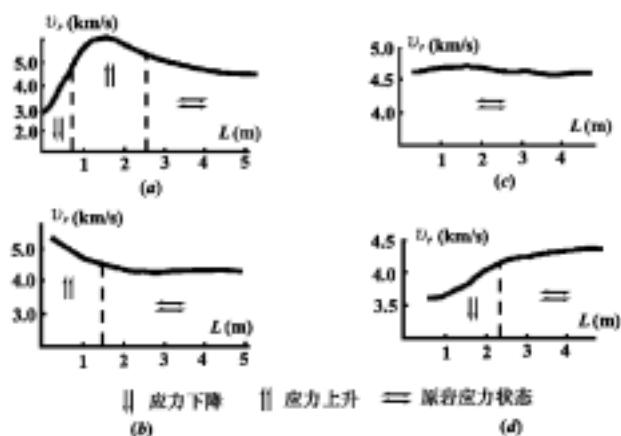


图 4.9.4 洞室松弛带测定波速与
钻孔深度变化关系曲线

(3) 图 4.9.4 (c) 所示，洞壁松弛不明显，各测点波速基本一致，波速较高，但总的波速接近于完整岩体的波速。

(4) 图 4.9.4 (d) 所示，洞壁松弛，应力集中现象不明显，这种现象常出现在洞壁岩体较为破碎的洞室。

4.9.5 洞室松弛带测定应提交的主要图件有波速随孔深变化的 v_p-L 曲线，松弛圈断面波速曲线展示图及松弛厚度分布图。

坝基施工检测

4.9.6 坝基施工检测，一般包括坝基建基面检测，边坡开挖范围及爆破影响深度的测定。

4.9.7 坝基施工检测的地质—物性特点

(1) 在坝基施工检测中，主要是检测基础岩体存在破碎、风化的低速岩体，爆破、开挖造成的低速岩体厚度，以及风化卸荷带的厚度，这些低速岩体与围岩均存在明显的波速差异。

(2) 在地下水位以下，断层破碎带或裂隙密集带的物性表现为低电阻率、低波速、低密度，容易产生自然电位、自然放射性等物性异常。

4.9.8 坝基施工检测的方法技术

(1) 坝基建基面检测，主要是测定原定建基面设计高程以下一定空间范围内低速岩体的垂向分布及水平分布规律。通常是在钻孔中进行，钻孔一般按坝块和坝段布置。测试方法有垂向声波测井和地震检层测井；水平向地震跨孔测试和电火花声波的孔间穿透。

在断层破碎带及裂隙密集带的地段可辅以自然电位测井、伽玛测井和密度测井。

(2) 边坡开挖范围的测定，主要是对边坡风化卸荷带及低速岩体厚度的确定，物探方法可采用地震纵测线（小排列）进行，并配合风钻孔声波测试。

(3) 爆破影响深度的测定，是测定开挖过程中爆破后的松动岩体厚度，主要采用钻孔声波测试，通过测定确定爆破影响和原岩区的分界线，为撬挖提供资料。

4.9.9 坝基施工检测应提交的主要图件有：测孔 v_p — L 曲线、成果表，跨孔波速成果图及成果表，坝基波速分区图等。

固结灌浆及帷幕浆效果的检查

4.9.10 灌浆效果的检查目的在于了解改善基础岩石力学性能、增强坝基整体性和提高坝基防渗能力的情况。

(1) 物探方法主要采用声波测井、声速测井和自然电位测井。对帷幕灌浆效果的检查，还可辅以同位素示踪法测井。

(2) 为了检查灌浆前和灌浆后的波速变化，必须测取灌浆前和灌浆后的波速对比曲线，并计算出提高率（%）。测试过程中应密切配合压水试验和水泥注入试验，以便建立波速（ v_p ）与单位吸水量（ ω ）和水泥单位注入量（ c ）的相关关系。

4.9.11 灌浆效果检查应提交的主要图件有：灌浆前后 v_p — L 对比曲线图及成果表，测井成果图等。

4.10 坝址和主要建筑物区的环境放射性检测

4.10.1 环境放射性检测的目的在于掌握坝址、厂房等主要建筑

物周围环境电离辐射和环境样品中放射性辐射水平。从能否造成放射性危害角度出发,对待建和在建工程的主要工程部位、生活设施、建筑材料等进行环境放射性检测,为工程选址、设计、施工提供依据。

4.10.2 环境放射性辐射场的地质—物性特征

(1) 自然环境中、土壤、岩石、水、空气中,放射性元素的含量一般甚微,但不同岩性或相同岩性生成时代不同,其含量也不同,甚至有很大差别。氧化带中的铀元素,容易形成铀溶液进入地下水道,在运移过程中,遇到有利条件容易被胶结物质、粘土、有机物质所吸附富集而沉积,形成放射性异常。

(2) 岩石中,放射性元素的含量火成岩高于沉积岩和变质岩;火成岩中,花岗岩的放射性元素的含量最高。

(3) 断层破碎带是地下水和放射性气体的良好通道,浮土覆盖时,放射性气体氡及子体在覆盖层中积聚,易形成放射性辐射场强度升高。

(4) 放射性物质的倾倒,意外事故(丢失、泄漏、误排)、含放射性元素的工业废料等污染源。

4.10.3 环境放射性辐射的检测内容

(1) 坝址和主要建筑物环境伽玛照射量率。

(2) 环境中(土壤、空气、水)的氡、钍射气浓度。

(3) 坝址区内的水源(河水、泉水、井水)及土壤中的 U、Ra、Th、K 等放射性元素的含量。

(4) 基础开挖部位、采石场及建筑材料(粘土、砂、砾石等)的辐射水平。花岗岩及含放射性元素的料场,除测量石料本身的放射性辐射水平外,应注意能否在开采中造成环境放射性污染。

4.10.4 环境放射性检测的方法技术

(1) 伽玛测量:

伽玛测量的方法主要有地面伽玛测量、伽玛编录和岩芯伽玛测量三种基本方法。用于伽玛测量的仪器需用标准镭源校正,并

保证工作中的仪器灵敏度不变。其主要技术指标及使用要求见第 3.4.2.1 及 3.4.2.4。

地面伽玛测量：在踏勘基础上选定测区，布置测线，并通过天然和人工露头、构造破碎带，根据区内各种岩性的伽玛测量，用加权平均计算方法确定主要岩石的伽玛正常场值。当岩石伽玛强度超过该岩石正常值两倍时为偏高场，超过 3 倍正常值称异常场。若测区为大面积覆盖层时，异常幅度将大大降低，对有规律的偏高场应给予认真分析。

伽玛编录：对伽玛测量查出的基岩异常和地下厂房探洞应采用大比例尺（1:100 或 1:50）测网进行伽玛编录，圈定异常范围、走向。探洞的伽玛编录，一般取二壁一顶或一壁一顶，浅井编录为相邻的两壁。比例尺和地质素描图相同，使测点间距在平面图上 1cm 为宜。

岩芯伽玛测量：对岩芯进行连续听测，按岩性分段记录伽玛强度。

（2）射气测量：

在覆盖层中的偏高场或异常场上布置剖面并穿过异常两端各两个测点，测线方向与异常长轴垂直，点距 5~10m。

在各测点上分别用浅孔和深孔取气器，抽气测量射气浓度，确定射气来源。在测量中应保证各测点抽气次数及测量条件一致。在湿度过大的地方，不宜做抽气测量时，可用孔中伽玛测量代替。

空气和地下洞室的射气测量是监测岩石和土壤中的氡气扩散到空气中的程度，可以在需要部位定点定时测量。

（3）放射性水化学分析：露天水源、井、泉、河流汇合处，分别取水样做水中 U、Ra 等元素分析。

（4）放射性岩石化学分析：在伽玛测量的各异常部位取岩石样品送实验室做铀（U）、镭（Ra）、二氧化钍（ThO₂）、氧化钾（K₂O）等元素的化学分析。

4.10.5 环境放射性检测成果

（1）坝址及主要建筑物区环境放射性检测综合成果图：图上

应标明地质构造、岩性、检测方法、异常点位置、强度，放射性水化学及放射性岩石化学的采样位置、分析结果等。

(2) 坝址及主要建筑物区环境放射性检测，应根据区域地质情况说明一般辐射水平、异常和出露范围以及与岩性、地质构造的关系。由地面伽玛测量，射气测量、岩芯测量等分析放射性辐射在垂直地面深度方向上的变化，有无隐伏的辐射场源存在，会否逸散到地面造成环境放射性污染。

花岗岩体出露的坝段及地下厂房、洞室工程部位辐射防护安全检查，如：洞壁的辐射强度、空气中的射气浓度以及对工作人员（公众）的累积辐射剂量，应以国家标准 GB4792—84《放射卫生防护基本标准》中关于一般人员（公众）的年摄入（食入和吸入）量限值为准。

环境放射性辐射防护应以正当化、最优化和个人剂量限值的综合防护为原则。摒弃阈值观念，强调避免不必要的照射。对已出现的放射辐射偏高场，可采取屏蔽法减少辐射损害；对地下厂房应加强通风，保持良好的空气环境。

4.11 桩基检测

4.11.1 在基础工程中桩基的分类，按桩在土中传力作用分为支承桩和摩擦桩两类，而实际的桩基加载后常常是既有摩擦力又有桩端支承力。按成桩方法主要分为预制桩和灌注桩两类。桩基动力检测实际上是对激振后桩、土振动体系的检测。

4.11.2 桩基的物性特点

(1) 桩体与桩周土一般存在明显的波速差别。将桩基似为一维介质时，完好的桩，桩底与持力层处具有波阻抗差异而产生桩底反射；当桩体具有破损界面时，由于波阻抗差异而在界面处产生波的反射。

(2) 弹性波在混凝土中的传播速度一般为 $v_p = 3200 \sim 4200\text{m/s}$ ， v_p 与桩体混凝土的抗压强度有一定的相关关系，如桩体存在混凝土夹层和离析等缺陷，可以通过对桩体的动力检测，

判别桩体质量的好坏。

采用声波法检测时，在桩体质量均匀的混凝土中，波速基本上保持为常量，如果存在蜂窝、离析等缺陷，波速将大大降低。

4.11.3 桩基检测的主要内容

测定桩体波速、桩长，判定桩体有无扩颈、缩颈、断裂和离析缺陷，以及计算桩体承载力等。

4.11.4 桩基检测方法

检测方法主要有：

(1) 声波透射法。适用于检测大直径（大于 600mm）灌注桩的缺陷和质量。检测深度不受限制，不受桩周土的影响。

(2) 频率法。适用于检测不同成桩方式的摩擦桩的自振频率、桩长及计算承载力。桩的入土深度不宜大于 40m，也不宜小于 5m。

(3) 反射波法。用于检测桩身缺陷（断裂、离析、缩颈和扩颈）及其部位，对桩的混凝土质量作出评价。

(4) 机械阻抗法。适用于检测桩身混凝土的完整性，确定缺陷类型及其部位，并判定桩的承载力。本方法最有效的测试范围为 $L/d < 30:1$ （式中， L 为桩身长度， d 为桩的直径），最大测试范围为 $L/d < 50:1$ 。

(5) 水电效应法。适用于检测摩擦桩及支承桩的缺陷（断裂、离析、缩颈、扩颈）及其部位，并计算桩的极限承载力。本方法最大测试范围为 $L/d \leq 70:1$ 。

上述各种方法可根据桩基检测任务要求综合应用，如何选择最佳检测方法，主要取决于桩体类型和桩周土质条件。

4.11.5 仪器设备

4.11.5.1 声波透射法仪器：

(1) 通常采用声波检测仪，仪器主要技术要求详见 3.6 节。

(2) 发射换能器及接收换能器，采用径向水平面无指向性换能器，频率 25~50kHz，长度 20cm 左右，并装有扶正器，换能器

下方应悬挂重锤，换能器的水密封性应在 1MPa 水压下不漏水。为提高接收信号的信噪比，宜采用装有前置放大器的接收换能器，其频率带宽度应在 5~50kHz。

4.11.5.2 频率法仪器：可采用信号增强型工程地震仪，仪器主要技术要求详见 3.2 节。

4.11.5.3 反射波法仪器：可采用信号增强型工程地震仪，仪器主要技术要求详见 3.2 节。

4.11.5.4 机械阻抗法仪器：

(1) 可采用专门的机械阻抗测桩系统（稳态），也可采用通用测试分析仪器组成的仪器系统。

(2) 力传感器：

频率响应：5~1500Hz，幅度畸变小于 1dB。

灵敏度：不小于 10PC/kg。

(3) 测量响应的传感器：

频率响应：5~1500Hz，幅度畸变小于 1dB。

灵敏度：桩径 $d < 600\text{mm}$ 时

$S_v > 300\text{mV}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ （速度传感器）；

$S_q > 1000\text{mV}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$ （加速度传感器）。

桩径 $d > 600\text{mm}$ 时

$S_v > 800\text{mV}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ （速度传感器）；

$S_q > 2000\text{mV}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-2})$ （加速度传感器）。

横向灵敏度：不大于 5%。

(4) 电磁激振器：

最大出力：大于 200N ($d < 1.5\text{m}$ 的桩)；

大于 400N ($d = 1.5 \sim 3.0\text{m}$ 的桩)。

非线性失真：小于 1%。

4.11.5.5 水电效应法仪器：

可采用专门的水电效应测桩系统，也可采用由震源、信号接收、记录、信号处理组成的仪器系统。

4.11.6 桩基检测技术

4.11.6.1 声波透射法:

(1) 大型灌注桩有预留孔时,可供声波透射法测井,检测管孔内应注满清水作声波耦合剂。

(2) 检测主要进行孔间穿透对测,发射换能器和接收换能器分别下至孔底,然后同步提升,在不同深度处(点距 5~20cm)进行声波测量并进行记录。

(3) 检测时,发射电压及放大器增益固定在适当值后,均应始终保持不变。

4.11.6.2 频率法:

(1) 检测前必须认真清除桩顶浮浆低强度部分,使桩顶基本平整规则,并剪去过长的钢筋。

(2) 采用竖向激振,竖向接收方式,用石膏将检波器固定于桩顶接收。激振方式有两种:直接敲击桩头,此法适用于淹水地区或桩周地表不平时。桩边土激振,适用于桩顶面积较小时,可在桩侧约 50cm 处的地面激振,由地震仪记录振动波形。

(3) 为了使资料具有可比性,一个工区同一种方法的接收参数应尽量保持一致。检测时应切除滤波器以达全通。接收检波器的采用,应注意检波器的固有频率与桩土振动频率的关系。一般桩土自振频率为 20~80Hz。

(4) 测桩的承载力,应敲击桩侧土使桩—土系统起振记录曲线,同时注意选择合适的扫描长度。

4.11.6.3 反射波法:

根据测定桩底反射时及缺陷部位反射时,在取得波速的情况下,计算桩长或缺陷部位。

(1) 同频率法(1)要求。

(2) 用石膏将检波器置于桩顶,用锤敲击桩顶产生沿桩身向下传播的弹性波,由地震仪记录桩底(和缺陷部位)返回的反射波形。

(3) 对每个检测工地,均应进行激振和接收条件的选择试验,以确定最佳激振和接收条件。对于大直径桩体(大于

500mm) 进行检测时,可安置两个或多个检波器点接收。

单次激振信号较弱时,可进行多次激振,将信号叠加增强,以压制随机干扰,提高信噪比。

放大器增益选择,不允许产生限幅削波现象。采样率选择应满足采样定理,记录时间长度应能记录到桩身多次反射。

为提高反射波的分辨率,应采用小能量激振,用截止频率较高的检波器接收,放大器宜采用宽带滤波。

4.11.6.4 机械阻抗法:

(1) 同频率法 (1) 要求。

(2) 在桩顶中心和两侧共三点凿成光滑平面,然后用环氧树脂或其他粘结剂把一块直径为 60mm 的钢板在顶面中心粘贴牢固,同时在直径两侧处各粘贴钢板一块。

(3) 安置好全部试验装置,并确认各项仪器设备处于正常工作状态后,方可开始检测。

(4) 检测时,激振器置于中心钢板上,速度计放在两侧钢板上,通过激振器(其工作频率由信号发生器及功率放大器调制)对桩头施加一个按正弦波变化的垂直力,并使激振力保持恒定,逐渐变动激振频率。

(5) 加速度计将激振信号输入到调节器中,起调整振幅的作用。

(6) 速度计即拾振器,其信号接收后经放大滤波由记录仪给出速度频率曲线,即速度导纳 v/F 随频率 f 而变化的曲线。

(7) 现场测试应尽可能防止机电设备的运转和车辆人员的来往,并选择天气晴朗、无风的日子进行,以保持高度的安静,减少不必要的噪声干扰。

4.11.6.5 水电效应法:

水电效应法的原理是冲击电流发生装置(电火花震源)在灌满水的桩头进行高压放电,使桩产生振动,然后进行检测的方法。

(1) 检测前,需在桩头设置储水器,并灌满水。

(2) 检测时,用电火花震源激震,放电电极垂直于储水器中

心，距桩顶 30cm，用水听器接收。水听器同样置于储水器中心，距桩顶 5~10cm，始终置于放电电极的下方，要求水听器与放电电极不相互碰撞，其水平距离尽量不大于 10cm。

(3) 由水听器检测到的响应信号，通过磁带机录制在磁带里，然后将记录在磁带中的信号，通过 FFT 频谱分析仪进行处理，即可得到检测信号的频谱曲线（不得出现限幅）及有关频率（ f ）和幅值（ A ）的数据，提供分析与计算。

4.11.7 桩基检测成果的分析与计算

4.11.7.1 声波透射法检测成果的分析与计算：

(1) 根据实测数据绘制声时或声速—深度曲线。声时 t_0 及声速 v 按下式计算：

$$t_0 = t - t_0 - t' \quad (4.11.7-1)$$

$$v = L / t_0 \quad (4.11.7-2)$$

式中 L ——两个检测管外壁之间的距离；

t_0 ——施测前测取的发射至接收系统的延迟时间；

t' ——检测管及耦合水层的声时修正值，按下式计算：

$$t' = \frac{D-d}{v_t} + \frac{d-d'}{v_w}$$

式中 D ——检测管外径；

d ——检测管内径；

d' ——换能器直径；

v_t ——钢管声速；

v_w ——水的声速。

(2) 桩身完整性的声时及声速判断：

用声时或声速的小概率 $\bar{t} + 2\sigma$ 或 $\bar{v} - 2\sigma$ 作为判断有无缺陷的临界值。其中：

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n v_i / n \quad (4.11.7-3)$$

$$\sigma v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 / n} \quad (4.11.7-4)$$

式中 \bar{v} ——平均声速；
 σv ——声速均方差；
 n ——测点数。

$\bar{t}+2\sigma t$ 的计算方法同式（4.11.7-3）、（4.11.7-4）， \bar{t} 为平均声时， σt 为声时均方差。

对超越临界值的测段即应进行缺陷分析与判断。

（3）桩身缺陷还可结合桩身纵波速度加以判定，表 4.11.7 标准可供参考。

表 4.11.7 桩身缺陷用纵波速度判定标准

v (m/s)	<1920	1920~2750	2750~3300	3300~4120	>4120
质 量	很 差	差	尚 可	好	优 良

4.11.7.2 频率法检测成果的分析与计算

（1）通过激发测试取得的实测波形记录分析，纵波先于横波到达，一般是激震振动波初至后大约一个周期左右为纵波，以后的续至波即桩体竖向振动的横波，在横波曲线段内，读取相邻 3 个波峰（或波谷）间的历时（ $2T$ ），取其平均数即周期（ T ），并计算出桩体竖向自振频率（ f_z ）：

$$f_z=1/T \tag{4.11.7-5}$$

（2）根据下式求得单桩竖向抗压刚度（ K_z ）：

$$K_z=\frac{(2\pi f_z)^2W}{\lambda g} \tag{4.11.7-6}$$

式中 f_z ——单桩竖向自振频率（Hz）；
 λ ——动力修正系数（ $\lambda=2.6$ 左右）；
 g ——重力加速度（ 9.8m/s^2 ）；
 W ——参振体重量（ t ），包括参振桩体重量 Q_1 和参振土体重量 Q_2 。

即
$$W=Q_1+Q_2$$

其中，参振桩体重量是按施工桩长的 1/3 桩段计算的即：

$$Q_1 = \frac{1}{3} A \cdot L_0 \cdot r_c$$

式中 L_0 ——施工桩长 (m)；

A ——桩的横截面积 (m²)；

r_c ——混凝土容重 (10kN/m³)。

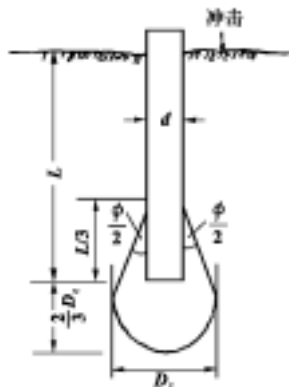


图 4.11.7-1 激振后的桩土体系

参振土体重量,按桩体下部 1/3 桩长处 $\phi/2$ 角向下扩展所形成梨形体计算(如图 4.11.7-1)即：

$$Q_2 = \frac{1}{3} \left[\frac{\pi}{9} r_z^2 (L + 16 r_z) - \frac{1}{3} A \right] r_r$$

式中 r_r ——参振土容重 (t/m³)；

r_z ——参振土体扩散半径 (m)，

$$r_z = \frac{1}{D} D_z$$

其最大直径 $D_z = d + 2 \times \frac{L}{3} \tan \frac{\phi}{2}$

ϕ ——参振土的内摩擦角 (度)。

其中 r_r 及 ϕ 由桩侧土的分层参数进行加权平均值求得。

(3) 根据下式计算单桩竖向(极限)承载力：

$$P_k = \mu \cdot K_z \quad (4.11.7-7)$$

式中 P_k ——单桩竖向承载力 (t)；

μ ——经验系数 ($\mu = 0.002 \sim 0.005$ ，一般取 0.0044 左右)。

4.11.7.3 反射波法检测成果的分析：

通过对反射波法检测资料分析，判别有无断裂、扩颈、缩颈等缺陷，并确定其部位，判别桩长及混凝土质量，对单桩完整性

作出评价。

(1) 质量好的单桩反射波具有以下特征：

桩底反射波明显，易于读到桩身波的双程传播时间值；

波形规则，波列清晰；

桩身平均波速较高；

同一工区桩体波形、桩底反射信号特征有较好的相似性。

(2) 断裂或离析部位所产生的反射波，其到达时要小于桩底反射到达时，并减弱桩底反射波的强度，甚至影响桩底反射波的出现。

(3) 缩颈与扩颈部位截面积变化，将出现明显的反射波，其部位可按反射历时加以估算，其性质可按相位判别。

(4) 桩底反射记录是激振震动后，在 Δt 时间内出现的桩底反射波，出现的部位与桩长相关。

如已知桩长 L ，又可精确测定桩底反射时 Δt ，则可按下式计算 v_p ：

$$v_p = \frac{2L}{\Delta t} \quad (4.11.7-8)$$

此时，可参照表 4.11.7 评价桩身混凝土质量。

如 v_p 已知，可按下式计算桩长 L ：

$$L = \frac{v_p \Delta t}{2} \quad (4.11.7-9)$$

如计算桩长小于实际桩长，说明桩身断裂或有严重缺陷。

4.11.7.4 机械阻抗法检测成果的分析与计算：

(1) 确定桩长 L 及桩体波速 v_p ，参照图 4.11.7—2，由共振峰（两相邻波峰）间距 Δf 可知：

$$\Delta f = \frac{v_p}{2L} \quad (4.11.7-10)$$

若 L 已知，则可求得 v_p ，用以判定桩身质量。

若 v_p 已知，则可求得 L ，如计算桩长 L 较实际桩长短，可能是破损、缩颈等缺陷所致。

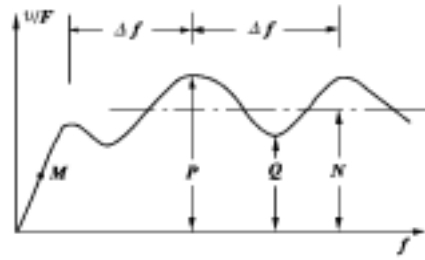


图 4.11.7-2 $v/F \sim f$ 曲线

(2) 导纳的几何平均值 N : 由实测 $v/F \sim f$ 曲线可求出:

$$N = \sqrt{PQ} \quad (4.11.7-11)$$

式中, P 、 Q 是导纳曲线的振幅极大值和极小值。

N 的理论计算公式为:

$$N' = 1 / \rho_c \cdot A_c \cdot v_p \quad (4.11.7-12)$$

式中 ρ_c ——桩身混凝土密度 (g/cm^3);

A_c ——桩的横截面积 (cm^2)。

如实测的 N 比 N' 大很多, 表示桩的混凝土质量欠佳或桩的上段有缩颈等缺陷。反之, 如实测 N 值比 N' 小很多, 表示桩体有扩颈的地方。

(3) 确定抗压刚度: 根据 $v/F \sim f$ 曲线的初始直线段上的 M 点, 其直线斜率的倒数为动力刚度:

$$E' = \frac{2\pi f_M}{|v/F|} \quad (4.11.7-13)$$

式中 E' ——动力刚度 (t/mm)。

动力刚度和静力刚度的关系, 经研究对比得知动力刚度约为静力刚度的 1~1.8 倍, 平均值为 1.47。因此, 可初步地将动力刚度除以 1.5 作为该桩的静力刚度 E_s 。(通常桩底土质好时采用 1~1.4, 土质软时采用 1.4~1.8)。

(4) 确定单桩极限承载力:

$$P_k = S \cdot E_s \quad (4.11.7-14)$$

式中 P_k ——单桩极限承载力 (t);

E_s ——静刚度 (t/mm);

S ——经验数值, 允许沉降量 (mm)。

对于 S 值的选取, 要视建筑物等级、桩基的地质条件及桩的类型和桩的几何尺寸而定。对于支承桩 $S=4\sim6.5\text{mm}$, 对于摩擦桩 $S=3\sim5\text{mm}$ 。在同一地质类型、桩的类型相同时, 桩径及桩长越大, S 取值越大; 建筑物等级高、桩基土质差可以取小值。但是最可靠的选定 S 值的方法, 还是通过与静载试桩进行对比后确定。

4.11.7.5 水电效应法检测成果的分析:

根据水中传感器收到的响应信号, 通过具有 FFT 运算数据处理, 即可得到频谱曲线或导纳曲线及有关数据, 依此来判定桩基质量、混凝土强度和桩基结构的完整性。

(1) 声波速度的确定按下式计算:

$$v_p = 4Lf_1/a \quad (\text{支承桩}) \quad (4.11.7-15)$$

$$v_p = 2Lf_1/a \quad (\text{摩擦桩}) \quad (4.11.7-16)$$

式中 L ——桩长 (m);

f_1 ——桩的第一频率 (基频);

a ——即 f_1/f_b (f_1 为桩的第一频率, f_b 为标准桩的第一频率)。

(2) 根据频谱曲线和时域曲线特征判别桩的结构完整性。

完整桩: 频谱曲线只有一个主峰 (单峰), 时域曲线波形上下对称。

断裂桩: 频谱曲线出现多峰值, 且第二峰高于第一峰, 有时主峰 (第一峰) 不明显, 时域曲线波形混乱。

扩颈桩: 频谱曲线主峰值高, 其他峰值较低; 时域曲线波形基本对称。

缩颈桩: 频谱曲线呈双峰或多峰, 峰值高低不明显, 时域曲

线波形上下不对称。

离析桩：频谱曲线出现多峰值，峰值呈逐个衰减趋势，时域曲线波形上下不对称。

(3) 根据频谱曲线判别缺陷深度：

$$L = a v_p / I f_1 \quad (4.11.7-17)$$

式中 L ——桩体缺陷深度 (m)；

I ——支承桩取 4，摩擦桩取 2；

f_1 ——异常峰频率 (Hz)。

(4) 根据导纳曲线计算桩的平均导纳：

计算式同式 (4.11.7-12)，然后可以反算出 A_0 ，用以判断桩径变化。

(5) 求动刚度：

$$E' = (2\pi f_1)^2 F / g \quad (4.11.7-18)$$

式中 f_1 ——桩的第一频率 (Hz)；

F ——激振力；

g ——加速度。

也可根据 $v/F \sim f$ 曲线初始直线段上的 M 点求得，见 (4.11.7-13) 式。

(6) 单桩极限承载力：

根据经验：极限承载力与动刚度有如下关系：

$$P_k = K \cdot E' \quad (4.11.7-19)$$

式中 K ——承载力系数，在 0.006~0.012 之间，具体通过与静载试桩对比确定。

4.11.8 桩基检测记录有下列情况之一者，应予作废。

(1) 对低速异常点未作重复检测。

(2) 由于激振或接收条件不正确，所取得的记录。

(3) 干扰背景妨碍了有效波的识别和影响准确分析的记录。

(4) 记录点号与实测桩号混淆不清，记录上未注记或注记错误，以致不能利用的记录。

4.11.9 对桩基检测成果应进行检查观测，检查观测的工作量不

得少于总工作量 10%，对判定为不合格的桩体（疑为缺陷桩、缩颈桩或断桩等）应全部进行重复检查观测。

4.11.10 桩基检测应提交的成果

- (1) 检测报告。
- (2) 桩基检测平面分布图。
- (3) 有声波透射法检测应提交声时或声速—深度曲线。
- (4) 分析结果一览表。
- (5) 检测成果表。