

应用弹性波法对岩体结构分类 及有关问题解析

王清玉

(天津勘测设计院 天津 300222)

摘要 本文介绍了弹性波法在大柳树坝址区岩体分类中的应用,并就实际工作所遇到的几个问题进行探讨。

关键词 弹性波法 岩体结构 纵波速度 V_p 完整性系数 K 弹性模量 E_s 穿透波 瑞利波

1 概况

黄河大柳树坝址位于宁夏回族自治区中卫县境内。该坝址勘测设计工作已断续进行30多年。取得了较丰富的弹性波资料,为对岩体结构定量化分类提供了科学依据。

该坝区主要地层为寒武系中统香山群第四亚群,岩性为变质长石砂岩夹千枚状板岩。由于坝区历经多次构造运动,又处于几个构造的复合部位,断层、裂隙极为发育,千枚状板岩多形成挤压破碎带。岩石被切割成大小不等的块体,岩层扭曲剧烈。

2 岩体结构弹性波法分类的依据

由于岩体经历了多次构造运动,构成了复杂的地质结构。不同类型的地质体,由于历史差别,所受的地质作用不一,故而具有不同的岩体结构和特性。实践表明:弹性波运动在岩体中与在弹性均一的介质中不同,由于结构面的影响,因而往往具有显著的不均一性,即各向异性和不连续性。它们将直接影响到弹性波在岩体中的传播。

当弹性波在传播路程中遇到结构面时,

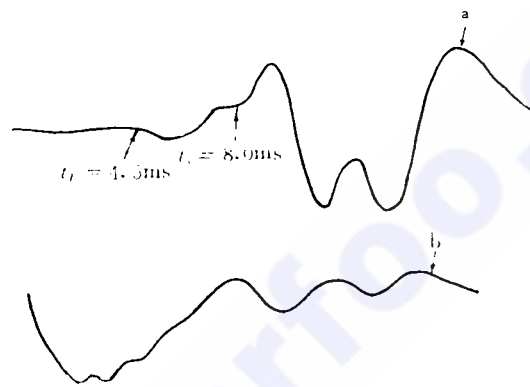


图1

由于动应力的作用使结构面产生不同形式的变形,通过变形应力波继续往前传播。由于结构面的变形较岩石弹性变形显著,而具有非线性特征,所以能量损失较大,同时结构面法向刚度、剪切刚度由于岩性不同,弹性波在穿过结构面时将产生折射和反射,使波幅显著衰减。在遇到张开裂隙、断层面时,波形亦可能发生畸变,图1a是正常波形,纵、横波初至均易分辨;b为畸变波形,初至时难以判识并形成曲折的传播路程。沿结构面方向弹性波能量集中起导波作用,而在垂直结构面时易产生反射和绕射情况,起隔波作用。当岩体中有特别发育的结构面时,可能造成明显的各向异性(在该坝址平洞岩体弹性波测试中,变质长石砂岩各向异性系数 $n = 1 \sim 1.5$,板岩大约为1.3)。由上所述,岩体结构影响岩

体中弹性波的传播。换言之,岩体中弹性波的波动特性反映了岩体的结构特征。这正是依据弹性波法对岩体结构分类和评价的物理依据。

3 测试方法及评价指标

3.1 测试方法

本文所指测试方法包括超声波法、声波法及地震波法。

超声波法主要是对岩石标本或现场大块完整岩石进行测试,使用 20~200kHz 压电晶体激发和接收超声波,用超声波法测得岩石的波速,代表组成岩体的物质特征,是岩体分类的基础资料。

声波法对工程岩体分段,其频率为 1~20kHz。

地震波可用作较大范围或工程地区岩体分类、分区的测试。频率一般为 0.01~1kHz。

应用弹性波法对工程岩体进行分类的主要作用在于:

使地质分类和分段有一个定量指标,易于掌握;

发现和纠正地质分类、分段中的不足和不正确之处;

直接或间接确定工程岩体设计参数。

3.2 评价指标的选取

从所周知:从弹性波波列上可以获取两类指标,一类为运动学指标(如纵波速度 V_p 、横波速度 V_s);其二为动力学指标(如纵波频率 F_p 、横波频率 F_s)。前者一般较易获得且应用较为成熟。后者往往较难获得,即使获得其可比性亦不如前者。因此本文以运动学指标为基本。大柳树坝址经过对弹性波资料的综合分析,选取了以纵波速度 V_p (m/s)、弹性模量 E_s (MPa)、完整性系数 K 做为岩体分类的系列指标。

一般而言,纵波速度 V_p 越高,反映,相应的岩体越坚硬致密,软弱结构面,节理、裂隙

越少;反之,相应岩体越破碎,完整程度差。因此,可根据 V_p 对工程岩体进行分类。

岩体完整性系数 K 是实测岩体波速与完整岩石波速比的平方值,即 $K = (\bar{V}_{p\text{岩体}} / \bar{V}_{p\text{岩石}})^2$,故当岩体中存在裂隙时,由于波阻抗的差异,传播途径发生改变,因而 $\bar{V}_{p\text{岩体}}$ 降低,则岩体完整性差。若 $V_{p\text{岩体}} = V_{p\text{岩石}}$,说明在测试范围内岩体很完整,故 K 反映了岩体相对于岩石的完整程度。

岩体的弹模量 E_s 是通过实测纵、横波速计算出来的一种物理力学指标,它是评价岩体完整、破碎程度,硐室围岩稳定性的重要参数。

4 实测弹性波资料分析

4.1 探洞地震波连续测量资料分析

采用“小相遇时距法”测试方法进行测试,该方法的主要优点:能更真实地求取岩体的地震纵、横波速,便于资料的统计分析,且能对洞壁岩体的松动厚度进行评估。

表 1 探洞洞壁地震纵波测试成果表

风化程度 洞号	纵波速度 V_p (m/s)		
	强风化	弱风化	微风化
303	850~1380	1100~2560	
313	2860~3400	1950~4400	4400
319	560~4200	1100~4080	2400~3650
329	810~3190	1610~2400	
304	940~2500	1200~3620	3000~4000
306	960~1940	700~2000	1750~3300
308	820~1590	1250~2750	1000~3300
324	1060~3500	1130~3500	
328	950~3550	2500~4400	4000
332	1470~3160	2430~4000	3130~4000
322	1240~3320	1810~4500	2400~3500

表 1 为部分探洞洞壁地震纵波测试成果,从表 1 及其它探洞洞壁地震波纵波速度资料分析,洞壁岩体纵波速度值较为离散, V_p 一般为 1500m/s~3500m/s,且不随洞深的增加而显著升高,主要受岩性、构造及风化等因素的控制。

以 332[#] 探洞为例略加说明, 该支洞全长 99m, 共分成 19 个子地质单元体。经统计分析平均纵波速度 $V_p = 2400\text{m/s}$, 若将板岩、挤压破碎带(共 10.7m 长, 即 0~7.3m、66.6~68m、93.3~95.3m)扣除, 平均纵波速度可达 3000m/s。又由波速累积曲线分析, 若将 16 个子地质单元体共同统计, 其不均匀度 $S = 1.66 (1 \leq S \leq 2, S \text{ 越接近于 } 1, \text{ 岩体均匀性越好, } S \text{ 越接近于 } 2, \text{ 岩体均匀性越差})$, 而如将板岩、挤压破碎带扣除, 则 $S = 1.3$ (见图 2)。这说明岩性、构造的变化是制约纵波速度变化的主要原因。经宏观统计分析, 332[#] 下支右壁较完整砂岩、砂岩夹板岩(Ⅲ类岩体) $V_p = 2800 \sim 3300\text{m/s}$, $K = 0.3 \sim 0.44$, $E_d = 15000 \sim 22200\text{MPa}$; 砂岩夹板岩完整性差(Ⅳ类岩体) $V_p = 2400 \sim 2800\text{m/s}$, $K = 0.23 \sim 0.3$, $E_d = 10000 \sim 15000\text{MPa}$; 而板岩、挤压破碎带一般 $V_p < 2000\text{m/s}$, $K < 0.3$, $E_d < 9000\text{MPa}$ 。上述测试成果在宏观上与地质定性描述是吻合的。但 68~76m(岩性为砂岩), 因 $V_p = 3200\text{m/s}$, $K = 0.42$, $E_d = 20760\text{MPa}$, 我们将此段岩体定为Ⅲ类, 修正了原定为Ⅳ类的结论, 并得到地质人员的肯定。

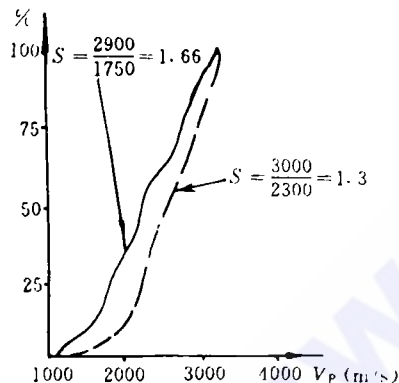


图 2

利用“小相时距法”不仅仅在于求取岩体的物理力学参数, 在条件许可的情况下, 应尽可能求出洞壁岩体的松动厚度, 以便为洞室的支护提供参数, 通过几下探洞的统计分析,

发现洞壁岩体的松动厚度一般为 0.4~3m。该结论与利用瑞利波探测的洞壁岩体的松动厚度在宏观上是吻合的。表 2 列出了瑞利波法探测某平洞不同结构类型的岩体围岩松动厚度。

表 2 不同结构类型的岩体围岩松动厚度

岩体结构	岩性	瑞利波第一波速界面厚度(m)
整体层状结构	厚层浅变质长石砂岩	0.5~1.2
层状结构	中厚层浅变质长石砂岩夹板岩	1.2~1.8
层状碎裂结构	中厚层浅变质长石砂岩夹板岩	1.8~2.5
散体结构	千枚状板岩、松散破碎岩	2.0~3.5

注: 岩体松动厚度一般小于 2.5m

由上所述, 我们认为在对该区岩体进行测试时, 应针对不同结构类型的岩体分别施测, 方能掌握其中的规律, 从而为工程地质评价提供科学的依据。

4.2 洞间穿透地震波纵波速度成果分析

表 3 探洞对穿地震波纵波速度成果表

洞号	风化程度		
	强风化	弱风化	微风化
313 [#] ~319 [#]	2100~2500	2500~3700	3100~4000
322 [#] ~332 [#]	2900~3200	3100~3800	3600~3700
304 [#] ~306 [#]	1800~2100	2200~2700	72800
306 [#] ~324 [#]	1200~2300	2200~2600	2600~3100
308 [#] ~314 [#]	1500~2100	1900~2400	2300~2700
319 [#] ~329 [#]	2100~2300	2300~3100	3100~3400

由表 3 显而易见洞间波速与岩体风化程度有较好的对应关系, 即

$$V_{p\text{强风化岩体}} < V_{p\text{弱风化岩体}} < V_{p\text{微风化岩体}}$$

以 304[#]~306[#] 对穿成果为例作说明:

野外工作方法首先是从 306[#] 洞开始放炮, 炮点距为 5m, 在 304[#] 洞接收地震信号, 检波距为 2m; 然后用同样的方法在 304[#] 洞放炮, 在 306[#] 洞接收, 共形成 706 地震波射线(26 个扇形面)辐射于两测段之间, 在空间

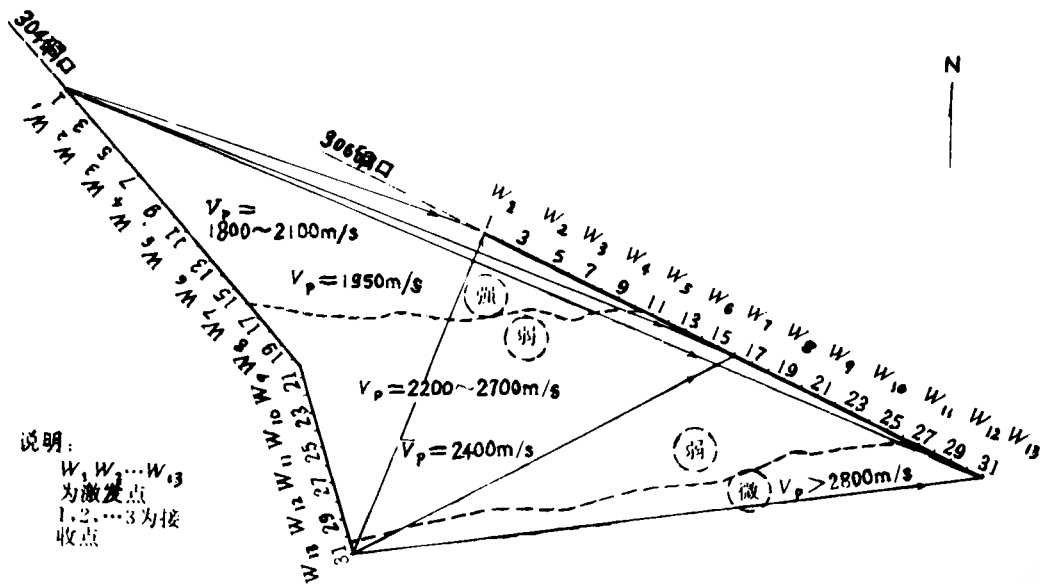


图3 黄河大柳树坝址右岸304~306平硐地震波对穿成果图

上对岩体形成强有力的约束。经宏观分析，地震波速度与岩体风化程度有以下对应关系。

强风化带：岩性为变质砂岩、板岩、多断层和挤压带、岩体被切割破碎， $V_p = (1800 \sim 2100\text{m/s}) / 1950\text{m/s}$ 。

弱风化带：岩性为变质砂岩、板岩，断层和挤压带较多见，一般属高倾角，岩体切割较破碎， $V_p = (2200 \sim 2700\text{m/s}) / 2400\text{m/s}$ 。

微风化带：岩性为中厚层变质长石砂岩，节理裂隙发育较差，断层和挤压带少见，岩体较完整。 $V_p > 2800\text{m/s}$ 。参见图3。

值得指出的是，如果利用层析技术对地震波穿透资料进行解释，则还可以从微观上对地质单元体进行诊断，从而使弹性波法解决地质问题的能力提高到一个新的水平。

由上所述，地震波穿透成果亦证实了岩体风化程度的划分是正确的。

4.3 钻孔声波测试结果分析

我们以××孔××段为例对声波测井成果进行分析，该孔0~4.5m为厚层浅变质长石石英砂岩，4.5~12m为厚层浅变质长石石英砂岩夹泥质板岩。在测试范围内取岩石试件5块，经测试，试件纵波速度为5000m/s，经对H— V_p 声波测井曲线宏观统

计，该测段岩体可划分为两个“母地质单元体”（仅限于岩体力学性质方面）。其一是0~4.2m，该段岩体声波纵波速度多集中在4000~4300m/s，均值为4150m/s，方差为450m/s，离差系数为10%，完整性系数 $\bar{K} = 0.69$ ，表明该段岩体均一，应归属于中等完整岩体；第二“母地质单元体”是4.2~12m，该段岩体 V_p 多集中在3500m/s左右，方差为130m/s，离差系数为4%， $\bar{K} = 0.5$ ，亦表明该段岩体均一，也应归属中等完整岩体。又从微观上分析，上属两个“母地质单元体”均可分为六个“子地质单元体”。详见图4。

另外，声速曲线上的低速点为岩体裂隙或泥质板岩所致。如6.2m、6.6m处。

又因第一“母地质单元体”岩体质量指标 $\overline{RQD} = 70\%$ ，第二“母地质单元体”岩体质量指标 $\overline{RQD} = 59\%$ ，故声波测井成果不仅从定性方面与地质结论吻合，而且从量的方面也与地质结论一致，并提供了岩体的物理力学参数。

经综合分析弹性波资料及其它相关资料得出岩体结构分类的初步结论如下：

1. I类岩体，以整体层状结构为主。主要为中厚层浅变质长石砂岩，构造影响一般~

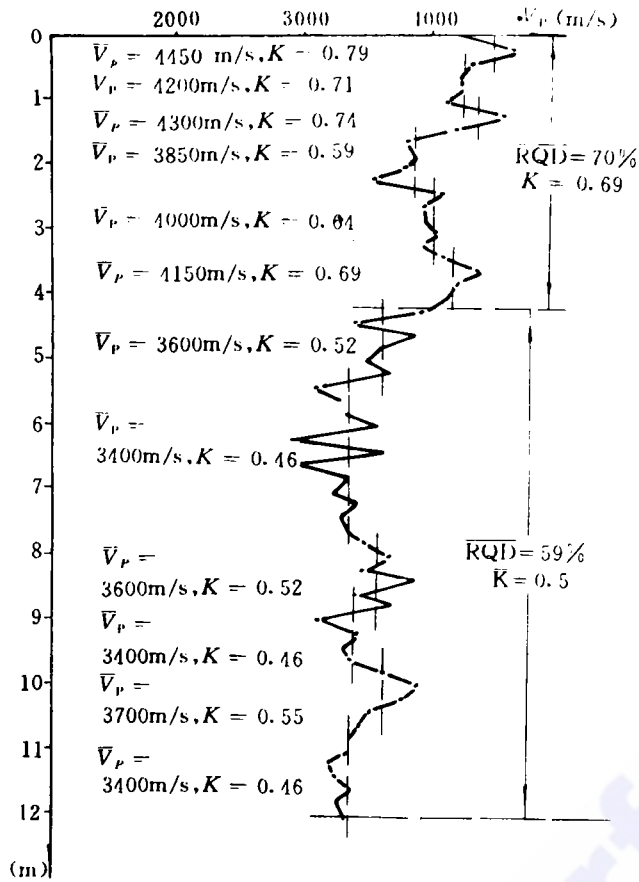


图4 ××孔声波测井成果图

较重,裂隙2组,间距大于0.4m,近闭合~闭合,无充填。结构面多为刚性结构面,除层间外,贯穿性较差,块间接触紧密,偶有小断层和层间错层现象。以微风化为主。 $V_p > 3200\text{m/s}$, $K > 0.42$, $E_d > 20000\text{MPa}$ 。

2. III类岩体,以层状结构为主。主要为较完整的砂岩、板岩、粉砂质板岩,岩体呈互层状和薄层状。构造影响较重,节理裂隙发育,裂隙组数2~3组,间距为0.3m,近闭合,多无充填,局部充填有少量岩屑,岩粉等,块间咬合较好,伴有少量断层和挤压破碎带等贯穿性较弱结构面。以弱、微风化为主。 $V_p = 2200 \sim 3200\text{m/s}$, $K = 0.2 \sim 0.42$, $E_d = 9000 \sim 20000\text{MPa}$ 。

3. IV类岩体,以碎裂结构为主。主要为完整性差的砂岩、板岩及构造影响带等。构造影

响严重,结构面发育~很发育,裂隙3组以上,间距0.2m左右,一般呈张开状态,多无充填,局部少量岩粉,岩屑等充填,块间咬合力较差,常伴有断层,挤压带等软弱结构面。 $V_p = 1500 \sim 2200\text{m/s}$, $K = 0.09 \sim 0.2$, $E_d = 5000 \sim 9000\text{MPa}$ 。

4. V类岩体,以散体结构为主。组成物为破碎的砂岩、板岩岩块、岩屑、糜棱岩和断层泥等,构造影响很严重。主要为构造破碎带、交汇带、严重影响带和微风化带等。各种结构面发育密集,块间咬合力很弱。 $V_p < 1800\text{m/s}$, $K < 0.1$, $E_d < 6000\text{MPa}$ 。

5 问题及其解析

1. 硬岩在饱和状态下或湿度较大时,纵

波速度 V_p 一般要增大;而软岩在饱和状态下或湿度较大时,纵波速度 V_p 一般不变或略有下降。原因在于,任何硬岩都有一定的孔隙、裂隙,孔隙、裂隙岩体饱水后,改善了耦合状态。故在饱和状态下,或湿度较大时, V_p 要有所增加;而软岩由于饱和状态下或湿度较大时,岩石骨架结构遭到破坏,故 V_p 一般反而要降低。以该工程为例,同类砂岩岩体 V_p 在饱和状态下或湿度较大时比干燥状态要增加 200~400m/s,千枚状板岩、挤压破碎带 V_p 变化不大或下降 200m/s 左右。同时,在该工程的实践也证明,横波 V_s 受岩石湿度的影响要比纵波小,这是因为横波为剪切力作用的结果,而水不传播横波的缘故。

2. 声波,地震波在同一岩体中的传播速度往往不一,且前者一般情况下要高于后者 5%~25%。为了正确引用资料,用户往往会提出引起声波、地震波差异的原因何在?笔者认为引起声波、地震波差异的原因很多,但最主要的原因在于:由于地震法激发地震波的能量较大,地震波在岩体中的传播可分为三个阶段,第一阶段岩体为非弹性体;第二阶段岩体为塑—弹性体;第三阶段岩体为弹性体。而声波由于能量小,频率高,故声波在岩体中的传播可视为在弹性介质中传播。所以,就同一岩体而言,声波的传播时间要较地震波的传播时间少,即同一岩体声波的传播速度要较地震波快。以该工程为例,见图 5,笔者和同行们一起通过初步实验证明,声波、地震波波速差异为 5%~22%,且多集中在 10%~15%。

3. 该坝区洞间穿透波速与岩体风化程度的相关性比洞壁波速与岩体风化程度的相关性为好,笔者认为,主要由于坝区历经多次构造运动,断层、裂隙极为发育,洞壁岩体应力重新分布以及岩石的各向异性所致。

本文限于篇幅仅就上述三个问题进行了粗浅的分析。为在搞清弹性波传播机理与岩体物理特性之间的相关性,以深化弹性波资

料的分析。

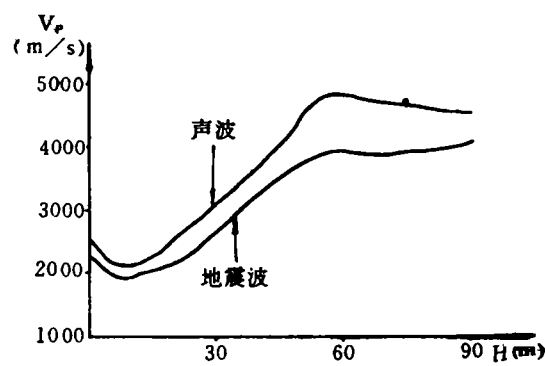


图 5 声波~地震波情况

6 结束语

1. 应用弹性波法对工程岩体结构进行分类的主要作用在于:使地质分类和分段有一个定量的标志;发现和纠正地质分类、分段的不足和不正确之处;直接或间接确定岩体工程设计参数(如弹性模量等)。该法具有效率高、周期短、成本低,可重复测试和易于掌握等优点。

2. 弹性波法对工程岩体结构分类必须与工程地质分析紧密配合,方能真正发挥它的作用,最主要的是必须以工程地质单元和岩体类型为出发点来考虑布置工作和分析资料,从而使岩体特性与物理现象的相关解释能尽量正确地反映客观现实。

3. 本文从客观实际出发,仅选用纵波速度 V_p 、完整性系数 K 以及动弹性模量 E_d 作为弹性波法对该坝区岩体结构分类的指标,从使用效果看是可行的。这说明应用弹性波法对工程岩体结构分类针对不同工程优选指标,以达简明速用之目的。

由于笔者理论水平和实践经验的不足,文中谬误之处欢迎批评指正。

致谢,谨向参加本次工作的各位同事及协助我们工作的地质工程师表示感谢!