

三峡库区工程加固地质体的动弹力参数测试法试验研究

杨勤海

(中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所, 河北·保定 071051)

[摘要] 对三峡库区的松散地质体灌浆加固试验进行声波测试,即可获得松散岩体的主要地球物理动力学参数,为库区移民安置区的地基处理与合理开发提供科学依据,又可定量、全面评价三峡库区的松散岩体的稳定性。结合以往的声波测试成果,运用声波测试技术和方法,论述声波测试方法在研究库区测试松散工程体灌浆加固的效果。

[关键词] 三峡库区 松散地质体 声波测试

1 前言

在长江三峡库区移民安置中,奉节、巫山等不少城镇新址都遇到对复杂成因的第四系松散堆积层组成的滑坡、崩塌、岩溶等地质灾害体土地资源开发利用问题。这些地带基本上是县城新址就地后靠的主要部位,由于其成因复杂,工程地质条件特殊,在县城迁建规划中未能充分加以利用,严重地妨碍了城市的建设和发展。第四系松散堆积体的地质成因虽然复杂、特殊,但是作为建筑地基,其工程地质条件并不很差,只要能充分进行论证,辅以必要的地质体改造工程,就可以为迁建城市所用,对其合理开发利用,可增加迁建城镇的土地资源,产生巨大的经济效益和社会效益。近年来,对于这类复杂成因的第四系堆积体的研究成为工程地质界关注的焦点。本文介绍了声波测试技术及其在三峡库区工程地质体灌浆加固试验研究情况,结合以往在库区开展的一些有关岩土弹性参数与力学性质的关系方面的试验和研究工作,及通过声波测试结果给出了工程地质体的力学指标,在一定程度上能够反映试验场地的动力学性质,可以定量、全面评价加固效果。

2 试验场地地质条件与地球物理特性

2.1 试验场地地质条件

试验场地选择在移民迁建急需、且地质条件典型的地方,即奉节宝塔坪规划小区的赵家梁子一带和巫山二道沟四大家一带。因位置不同,试验场地的地质条件差别较大,反映了松散堆积体结构的不同性。各试验场地的岩性特征简述如下:

奉节第一组上部 3m 左右为第四系坡积含碎块石亚粘土,密实。下部为深灰色薄—中厚层泥灰岩,裂隙发育,岩层破碎,岩芯呈短柱状、饼状及碎块状。

奉节第二组上部为粉土含碎块石角砾,稍密,透水性弱,下部为碎块石,粘土充填,后经开挖验证:2m 以上为坡积亚粘土含块石,密实;2m 以下为黄褐色—灰色泥灰岩。岩层裂隙发育,强风化,在 6m 以上段裂隙被泥质充填紧密,6m 以下段充填物较少。

巫山第一组上部 13 m 以上段为绿灰色泥灰岩,中强风化,垂向裂隙发育,多被泥质充填,岩芯呈碎块状,钻进过程中 3—12m 段易垮塌,一般不漏水。13m 以下为钙质粉砂质泥岩,暗紫红色,裂隙发育,岩芯仍较破碎。

按设计要求,每组试验均由 7 个钻孔组成,中间 1 孔,周边 6 孔,呈梅花状分布,其中 3 个为灌浆试验孔,4 个为测试观测孔,奉节试验点孔深为 20m,巫山试验点为 18m。各孔浆液配比、灌浆量均不同。

2.2 试验场地地球物理特性

根据以往在巴东黄土坡滑坡、万州关塘口滑坡等地及实测资料,试验场地完整岩体的声波速度一般在 3000m/s 以上。由于库区大部分地质条件较差。基岩上部的地层破碎、裂隙发

育、完整性差。声波速度变化区间较大，多在 700~2600m/s 之间。声波在岩体中传播时，其参数的变化直接反映岩体的地质构造和物理力学性质，

声波测试岩体（石）的弹性力学参数是在快速瞬间加载情况下完成的，称为动力法。所测得的参数称为动弹性参数，如动弹性模量 E_d 、动泊松比 μ_d 、动剪切模量 G_d 等。只要测得岩体的纵波速度、横波速度，密度，则可根据下列工程式计算出岩体（石）的动弹性参数。

动弹性模量计算公式：

$$E_d = 2V_s^2\rho(1 + \mu_d)$$

动剪切模量计算公式：

$$G_d = V_s^2\rho$$

动泊松比计算公式：

$$\mu_d = (1/2(V_p / V_s)^2 - 1) / (V_p / V_s)^2 - 1$$

式中 V_p ——为纵波速度 km/s ；

V_s ——为横波速度 km/s ；

ρ ——为岩石密度 g/cm³ ；

E_d ——为动弹性模量

G_d ——为动剪切模量

μ_d ——为动泊松比

因此诸如纵波速度、横波速度、振幅、频率等参数，可作为评价工程岩体的定量依据，并可校验工程地质体灌浆加固的效果。声波测试主要是为了评价灌浆质量，而灌浆质量主要依据声波速度进行评价，根据声波测试获得的波速资料，结合地质资料，可准确定量评价灌浆效果，从而为试验场地的稳定性评价提供科学依据。

3 测试方法及技术

为了了解第四系松散堆积体灌浆加固效果，又要求所采用的方法快速、经济，声波测试技术是满足上述条件的首选方法。经过反复比较研究，松散堆积体灌浆加固试验检测方法主要选择岩芯测试、单孔声波测试及跨孔声波测试方法。

传播于固体中的声波是机械波。由于其作用力的量级所引起的变形在线性范围，符合虎克定律，也可称其为弹性波。声波测试与浅层地震、面波勘探同属弹性波测试技术范畴。声波测试所使用的波动频率从几十 Hz 到 50kHz（现场原位测试）和 50kHz 到 500kHz（岩石及混凝土样品测试），覆盖了声频到超声频，在检测声学学科领域中仍称其为“声波测试”。由于采用的信号频率要高于地震波和面波的频率，因此有较高的分辨率，适用于对岩体等地质目标进行较细致的研究。测试动力学参数具有设备轻巧、测试简便、经济迅速等优点，而且许多大型工程都要考虑岩土的动力学特征，因此测量岩体的动弹性参数具有实际意义。

3.1 岩芯试件测试

先将所选柱状岩芯切齐、磨平做好测试准备，后用纵波换能器、凡士林和岩芯耦合进行纵波波速测试；用横波换能器、锡铂纸与岩芯耦合进行横波波速测试。

采用的仪器为 CYC-4 型超声岩石测试仪 BPFT 型和 WT 型纵波探头 频率分别为 100kHz、25kHz；HT 型横波探头，频率为 460kHz。表 1 列出了灌浆前钻孔取芯的岩样试件声波速度及相关动力学参数实测资料。

表 1 岩芯测试成果表:

地点 与	岩性	纵波速度 $V_p / (m \cdot s^{-1})$	横波速度 $V_s / (m \cdot s^{-1})$	岩石密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	动泊 松比	动弹性 模量	动剪切 模量
---------	----	----------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	----------	-----------	-----------

编号					μ_d	$E_d / (10^4 \text{MPa})$	$G_d / (10^4 \text{MPa})$
奉节 1	泥质灰岩	2860	1640	2.52	0.25 3	1.707	0.681
奉节 2	泥灰岩	3860	2280	2.50	0.23 4	3.227	1.310
巫山 1	泥质灰岩	3880	2340	2.60	0.20 7	3.457	1.432
巫山 2	钙质泥岩	3300	2070	2.60	0.17 5	2.621	1.115

3.2 单孔声波测试

单孔声波测试是采用长源距一发双收探管，发射—接收间距 50cm，接收—接收间距 30cm。在钻孔（赋存井液的裸孔）内沿井壁发射、接收声波信息，测井时将探管下至井底，按测井点距（本次测试选用 0.5m 点距）向上测试，由笔记本计算机完成采集与存储，室内通过回放和资料处理拾取纵波，在采集波形中根据波形干涉点、幅度、频谱分析确定纵波初至走时，计算纵波波速。

测试使用的仪器为 SSJ-4D 全波列声波测井仪，井下探头：源距 0.5m，间距：0.3m，直径 78mm；电缆长度 300m。表 2 列出了此次试验场地灌浆加固试验中的不同期单孔波速实测资料。

表 2 奉节、巫山单孔波速表：

地点	组别	纵波速度 V_p (m/s)		
		灌浆前	7 天	28 天
奉节	第一组	960	1080	1200
奉节	第二组	1090	1170	1260
巫山	第一组	1210	1390	1460
巫山	第二组	1240	1360	1450

3.3 跨孔声波测试

跨孔声波测试法采用的是同步提升法：在其中一个钻孔（裸孔）内激发，另一个钻孔（裸孔）内接收，由孔底起始同步上升至上部，按测试要求点距向上测试，在一钻孔内由电火花（或剪切锤）发射信号、另一钻孔内由换能器接收声波信息，由仪器完成采集与存储，室内通过回放和资料处理拾取波形，在采集波形中根据波形干涉点、幅度、频谱分析确定纵波或横波初至走时，计算波速。

仪器采用 SWS—1 型多功能仪。（北京水电物探研究所研制）测试激发源一般采用电火花（湘潭市无线电厂生产）或剪切锤两种激振方法。贴壁式三份量检波器接收。表 3 列出了此次试验场地灌浆加固试验中的不同期跨孔波速实测资料。

表 3 奉节、巫山跨孔波速表：

地点	组别	纵波速度 V_p (m/s)		
		灌浆前	7 天	28 天
奉节	第一组	760	980	1280
奉节	第二组	810	1160	1370
巫山	第一组	1130	1470	1920
巫山	第二组	1170	1670	1810

4 试验场地力学参数及方法分析

4.1、通过采用声波测井方法对灌浆效果的检测，工程地质体改性加固灌浆后力学参数明显提高。

声波参数为：

- (1) 灌浆前：a.含粘土松散岩土体（巫山），纵波速度 1320m/s~1480m/s。
b.裂隙基岩破碎岩体（奉节），纵波速度 810m/s~1100m/s。
- (2) 灌浆后：a.含粘土松散岩土体（巫山），单孔波速平均提高 11%，跨孔波速平均提高 25%。
b.裂隙基岩碎裂岩体（奉节），单孔波速平均提高 14.6%，跨孔波速平均提高 65%。

场地力学参数为：

灌浆前：

- a.含粘土松散岩土体（巫山），地基承载力[R]=557(kPa)，凝聚力[C]=151(kPa)，压缩量[Es]=8.9(MPa)，摩擦角[φ]=36(°)
- b.裂隙基岩松动岩体（奉节），地基承载力[R]=388-438(kPa)，凝聚力[C]=92-110(kPa)，压缩量[Es]=6.9-7.3 (MPa)，摩擦角[φ]=25.6-29(°)

灌浆后：

- a.含粘土松散岩土体（巫山），地基承载力[R]=636(kPa)，凝聚力[C]=181(kPa)，压缩量[Es]=10.3(MPa)，摩擦角[φ]=41(°)
- b.裂隙基岩松动岩体（奉节），地基承载力[R]=504-568(KPa)，凝聚力[C]=134-157(kPa) 压缩量[Es]=8.1-8.9 (MPa)，摩擦角[φ]=31-37.1(°)

4.2 测试方法的分析

由上述中可以看出岩芯试件、单孔及跨孔的纵波速度存在明显的变化，这是因为岩芯试件、单孔声波、跨孔声波三种方法的测试结果之间具有可对比性，每种方法所呈现的波速变化与岩石、岩质之间的关系是互相对应的，趋势是一致的。只是由于测试方法的不同，其结果亦表现出不同的特点。

岩芯试件的测试一般是在规定尺寸上进行的。相对而言可以视为岩体一个点上的测试，测试频率范围为超高频；单孔声波测试的间距是 30cm，其所测的只是井壁圆柱体一个波长附近有限范围内的岩体声学特性，相对而言可以视为一段一维杆状岩体的测试，频率范围为高频；跨孔法在小孔距的范围内进行，与上述两种方法比较，测量范围要大的多，在较大的范围中，弹性波传播不但受岩质的制约，而且更重要的是受岩体结构面的控制。可以视为二维平板状岩体上的测试，频率范围相对为低频；由于上述的差别，表现在波速参数上的关系是岩芯试件测得的声速大于单孔声速，而单孔声速又大于跨孔声速（ $V_{岩芯} > V_{单孔} > V_{跨孔}$ ）。是符合客观规律的。岩芯测试反映的是岩体点上的声学特性，单孔反映局部岩体的纵向声学特性，而跨孔却代表岩体的横向变化。

5 结论与讨论

采用声波测试技术对三峡库区松散堆积体灌浆加固试验进行测试，取得了良好的效果，奉节、巫山两地的灌浆加固试验结果表明上述方法是可行的、有效的；声波测试不仅具有快速、简便、准确的特点之外，还是一种无损的测试方法，能够从整体上，全方位地评价灌浆质量。

应当指出，由于动力法是在瞬间加载情况下进行测试的，且对岩体施加的应力较小，因此，动、静弹性参数间存在一定的差异。为了满足当前工程技术界仍需将动弹性参数换算成荷载条件相近的静弹性参数的要求，有必要进一步研究二者之间的关系。但这个问题比较复杂

杂，一般其对应关系因不同岩性和不同地区而异。实际工作中，往往要进行一定数量的动静弹性参数的对比测试，才能找出其中的对应规律。

参考文献：

- [1] 郭建强等主编《地质灾害勘查地球物理技术手册》北京：地质出版社，2003
- [2] 林宗元主编《岩土工程试验手册》沈阳：辽宁科学技术出版社，1994
- [3] 陈仲候等主编《工程与环境物探教程》北京：地质出版社，1999