

岩芯卸荷扰动的声学反应与卸荷敏感岩体

李晓昭¹ 安英杰¹ 俞 缙¹ 徐鸣洁¹ 刘 彤¹ 章杨松² 罗骥先³

(¹南京大学地球科学系 南京 210093) (²南京理工大学土木系 南京 210000) (³南京水利科学研究院 南京 210024)

摘要 声波测试是工程岩体质量评价的最主要手段之一。将岩体与岩块的纵波波速比的平方定义为岩体的完整性系数, 不仅为国内外学者广泛认同, 而且是现行规范的定义。这是源于如下认识: 原位岩体的纵波波速小于其中岩块的波速; 岩体越破碎, 小得越多。然而, 通过润扬大桥声波测试发现, 用通常手段得到的大部分岩体的测井波速反而大于岩样波速。对该桥基岩 40 余个钻孔数百个岩样进行了多种手段的对比研究和综合分析, 探讨了测试结果的可靠性及产生原因, 进而提出了岩芯卸荷扰动和卸荷敏感岩体的概念和相应的工程对策。

关键词 岩体力学, 纵波波速, 岩芯卸荷扰动, 卸荷敏感岩体

分类号 P 69

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)12-2086-07

ACOUSTIC RESPONSES TO ROCK CORE UNLOADING-DISTURBANCE AND UNLOADING-SENSITIVE ROCK MASS

Li Xiaozhao¹, An Yingjie¹, Yu Jin¹, Xu Mingjie¹, Liu Tong¹, Zhang Yangsong², Luo Qixian³

(¹Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093 China)

(²Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000 China)

(³Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024 China)

Abstract Ultrasonic testing is one of the most frequently used measurements in geotechnical rock mass evaluation. The square of the ratio of longitudinal wave (P-wave) velocity of rock mass to that of rock block is defined as intactness index of rock mass. As we know, the P-wave velocity of in-situ rock mass is believed to be lower than that of relevant rock block. The more broken the rock mass is, the lower its P-wave velocity is than that of rock block. However, according to the result of ultrasonic testing carried out at Runyang Highway Bridge, it is surprised to find that most P-wave velocities of rock mass are higher than that of rock block. Many different measurements are applied in the comparative research, which is based on hundreds of rock cores collected from over 40 boreholes in the bed rock of the Bridge site, and the reliability and causes of the results are analyzed. The concepts of rock core unloading disturbance and unloading-sensitive rock mass are then put forward, with relevant engineering countermeasures.

Key words rock mechanics, velocity of P-wave, rock core unloading disturbance, unloading-sensitive rock mass

1 引言

声波测试是工程岩体质量评价的最主要手段之一^[1]。文[2, 3]通过对我国各部门、各工程的 460

组实测数据和国际典型工程实例的分析, 遴选出包括岩石声波速度 V_p 、岩体声波速度 V_{mp} 在内的工程岩体质量评价的九大指标。进一步, 以来自国防、建筑、人防、煤炭、冶金、铁道和水电部门的 103 个岩体工程的野外和室内测试数据为基础, 进行相

2002年1月8日收到初稿, 2002年3月7日收到修改稿。

作者 李晓昭 简介: 男, 1968年生, 副教授, 博士。1996年毕业于中国矿业大学建工学院, 获工学博士学位。1996~1998年, 在南京大学作博士后。现在南京大学地球科学系任教, 主要从事工程地质、岩土力学方面的教学和科研工作。E-mail: lixz@nju.edu.cn。

关分析与聚类分析, 可将这些指标分为 3 个族: 强度族、声波族和应力族, 其中强度族和声波族(岩石声速 V_p 、岩体声速 V_{mp} 、岩体完整性系数 K_v) 则独立于各种岩石工程, 能反映岩体质量的基本特征。

将岩体与岩块的纵波波速比的平方定义为岩体的完整性系数, 不仅为国内外学者所广泛认同, 而且是多个现行规范所采用的定义。这是源于如下认识: 原位岩体的纵波波速小于其中岩块的波速; 岩体越破碎, 小得越多。

然而, 通过润扬大桥(镇江—扬州)基岩的声波测试发现, 通过通常手段得到的岩体测井波速很多情况下反而大于岩样波速。这到底是什么原因?

作者参考南京大学地球科学系、南京水利科学研究院 2000 年科研报告“润扬长江公路大桥基岩技术孔超声波测试专题研究报告”, 对该桥基岩 40 余个钻孔数百个岩样通过如下的多种手段, 综合分析了测试结果的可靠性及上述现象产生的原因: (1) 岩芯鉴别与描述; (2) 岩芯节理裂隙的详细统计与描述; (3) 现场点荷载试验; (4) 波速测井; (5) 岩样的室内压力试验; (6) 岩样的声波检测(纵波、横波、频谱分析); (7) 岩矿鉴定。

2 润扬大桥基岩声波测试

2.1 工程背景

润扬大桥(镇江—扬州)是江苏高速公路建设的重要组成部分, 北联同江至三亚国道主干线, 南接上海至成都国道主干线。该桥全长 4 658 m, 由一座斜拉桥和一座悬索桥连接而成。其中, 南侧主江采用悬索桥, 一跨过江, 跨度 1 490 m, 为中国第一, 世界第三大悬索桥; 北侧夹江采用斜拉桥, 跨度 406 m。

该桥规模宏大, 地质条件又很复杂。桥址区覆盖层厚, 由于强烈的断裂切割和岩浆活动, 致使岩体质量变化很大。如何定量评价岩体质量, 确定岩体的物理力学参数, 成为桥梁设计的一个重点难题。为此, 总体设计单位委托南京大学地球科学系和南京水利科学研究院结构所组成联合课题组, 进行了技术孔超声波测试专题研究。

2.2 测试方法

波速测井采用 CTS-25 型超声仪, 测时精度 0.1 μ s。换能器为 JF-40 型, 频率 30 kHz。

采用单孔一发双收方式测井。为了保证首波经

由岩体传播, 发、收换能器的间距定为 50 cm, 接收换能器的间距 20 cm。为了保证换能器居中, 各换能器均套置橡胶扶正器。

岩芯检测采用 DB4, DB16 型多波参数分析仪, 采样长度 8 192 点, 通带宽度 1 kHz~1 MHz, 测时精度 0.1 μ s。纵波换能器频率: 50 kHz, 100 kHz, 240 kHz, 1 MHz; 横波换能器频率: 600 kHz, 800 kHz; 三分量探头频率: 150 kHz。

实验前预先将岩芯加工成圆柱体, 截面磨平抛光并保证平行, 饱水。试件直径均大于 6 cm, 长度小于 15 cm, 满足国内外有关规范要求。

实验用透射法对测, 即要求收、发探头中心在岩芯两端中轴线上, 并均匀适当加压使探头与岩芯通过耦合材料而紧密接触, 保证探头与岩芯接触面上洁净、无水迹、无砂粒等杂质。纵波检测用黄油作耦合剂; 横波检测用银箔作为耦合材料, 以压制纵波, 并有效地提高横纵波的波幅比。

为了提高测试精度, 采用信号叠加技术记录波形。整个测试过程中保持耦合状态不变。当由于岩样风化等因素导致横波首波判读有困难时, 可采用反向检测等方法进行对比分析。每批试件检测前后, 各测一次附加延时。

2.3 测试结果

对 11 类岩体数百个岩样测试和原位测井对比可见, 很多岩样的纵波波速小于原位测井波速, 见表 1 和图 1 示。

2.4 测试结果的可靠性检验

为了保证测试结果的可靠性, 进行了下面的校核: (1) 用中国土木工程学会建设工程无损检测委员会标定的标准棒, 对测试仪器进行了对零检测, 测时差异小于 0.1 μ s; (2) 对铝板进行了二维测试, 测试结果准确; (3) 对江苏地质工程勘察院取的同一块岩样, 分别由南京水科院结构所用本次声波测井用的 CTS-25 型超声仪和南京大学地科系用本次岩芯波速测试用的 DB4、DB16 型多波参数分析仪进行了对比测试, 测试结果一致。

2.5 其他工程的类似测试结果

由文[4]给出的声波测试结果, 南京长江二桥钻孔岩芯波速值比原位测井波速值降低了 45%~53% (表 2)。

另外, 文[5]也发现: 鲁布革水电站厂区岩体纵波波速达到 6 000 m/s, 而岩块的平均波速只有 5 000 m/s。

表 1 润扬大桥基岩波速测试结果的统计

Table 1 Statistical results of longitudinal wave velocity of bed rock at site of Runyang Bridge

岩组名称	岩组代号	样品数	岩样波速 V_{rp} 小于岩体波速 V_{mp} 个数	岩样波速 V_{rp} 小于岩体波速 V_{mp} 比例/%
强风化沉火山凝灰角砾岩	1—①	2	1	50.0
弱风化沉火山凝灰角砾岩	1—②	12	9	75.0
微风化沉火山凝灰角砾岩	1—③	32	27	84.4
强风化花岗岩	2—①	2	2	100.0
强风化花岗岩(受构造影响)	2—①f	2	2	100.0
弱风化花岗岩	2—②	13	3	23.1
弱风化花岗岩(受构造影响)	2—②f	61	42	68.9
微风化花岗岩	2—③	82	37	45.2
微风化花岗岩(受构造影响)	2—③f	34	28	82.5
构造破碎带(角砾岩)	3—②	7	3	42.9
构造破碎带(砂岩)	3—③	5	5	100.0

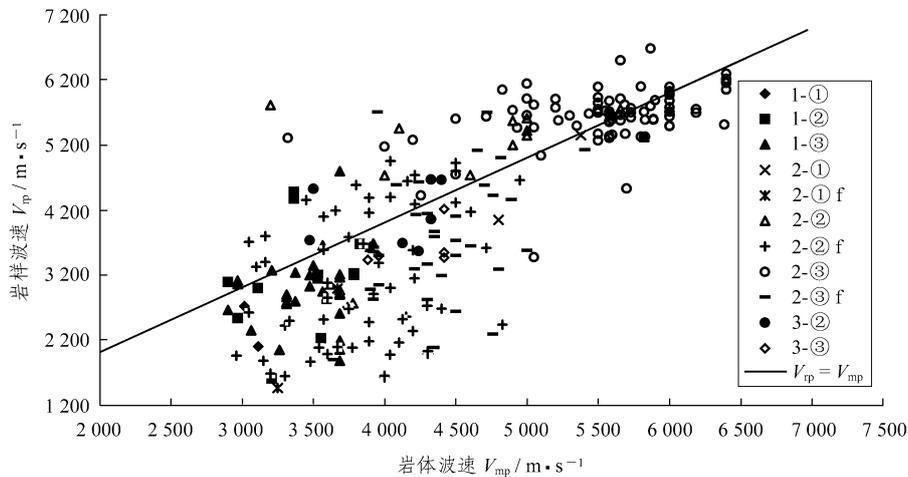


图 1 润扬大桥各类基岩波速测试部分结果

Fig.1 Some testing results of longitudinal wave velocity of various bed rocks at site of Runyang Bridge

表 2 南京长江第二大桥基岩波速测试结果^[4]

Table 2 Testing results of longitudinal wave velocity in bed rock of No.2 Nanjing Bridge across Yangtze River^[4]

岩性	岩样波速 $V_{rp} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$		原位测井波速 $V_{mp} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	
	范围值	平均值	范围值	平均值
砾岩	1.34~2.48	1.95	2.7~3.02	2.83
砂砾岩	1.29~1.69	1.49	2.67~2.84	2.81

3 岩芯扰动与卸荷敏感岩体

对该桥基岩 40 余个钻孔 11 类岩体(见表 1)数百个岩样的岩性、岩体结构和构造、裂隙特征与坚硬程度等各种特征,进行多种手段的鉴别、测试以后,终于找到了出现岩样波速反而小于岩体测井波速的原因,主要是由于岩芯钻取扰动,即卸荷扰动所致,

且存在比较明显的规律。

(1) 岩性

从表 1 和图 1 可以看出,沉火山凝灰角砾岩(岩组编号 1)岩样波速的降低比例和降低幅度明显高于花岗岩(岩组编号 2)。很显然前者对卸荷扰动更为敏感。同样,受构造影响的岩芯,卸荷后内部的裂隙容易张开,导致波速明显降低。弱风化花岗岩岩样波速 V_{rp} 小于岩体波速 V_{mp} 比例占 23.1%;对于受构造影响的弱风化花岗岩,这一比例上升为 68.9%。而微风化花岗岩由 45.2% 上升为 82.49%。

为了便于具体分析,表 3~6 列出了几个典型钻孔的测试结果。其中, M1' 钻孔为受构造影响的花岗斑岩,岩组编号 2-②f, 2-③f, 碎裂结构,块状构造,裂隙及不规则裂隙发育,裂隙面绿泥石化并伴有明显镜面擦痕。

T2', T10 孔为花岗斑岩,岩组编号 2-②, 2-③,

裂隙相对不发育,岩芯多呈短柱~长柱状,较完整~完整,局部较破碎,岩样较坚硬~坚硬。

Y12 孔为沉火山凝灰角砾岩,紫褐色杂灰绿色,角砾状结构,角砾棱角状,大小混杂,成分以安山岩为主,泥质、泥铁质胶结。

可以看出,沉火山凝灰角砾岩 Y12 孔和受构造

影响的 M1'钻孔岩样波速大多低于岩体测井波速,其降低值有的接近 2 000 m/s。

(2) 坚硬程度

从表 3~6 列出的几个钻孔相互对比可以看出,强度高的岩石对卸荷扰动的抵抗能力也较强。从每个钻孔内部看,对花岗岩(m1', T2', T10 孔)似乎这

表 3 M1'钻孔岩芯特征和测试结果

Table 3 Rock core characteristics and testing results in borehole M1'

样品号	岩组 编号	岩体测井纵波波速 $V_{mp}/m \cdot s^{-1}$	岩样纵波波速 $V_{rp}/m \cdot s^{-1}$	$V_{rp}-V_{mp}$ $/m \cdot s^{-1}$	岩样横波波速 $V_s/m \cdot s^{-1}$	岩样天然密度 $/g \cdot cm^{-3}$	岩样单轴抗压强度 R_c/MPa	备注
M1'-1	2-②f	3 164	3 803	639			7.98	
M1'-2	2-②f	4 150	2 563	-1 587			4.68	节理面蚀变,粘土化
M1'-3	2-②f	4 100	2 162	-1 938	885	2.61(饱水)	2.44	碎裂岩,裂隙密集
M1'-4	2-②f	3 100	3 330	230	1 646	2.5	7.75	60°, 75°交叉、闭合裂隙
M1'-5	2-②f	3 655	4 199	544	2 209	2.58(饱水)		75°裂隙,方解石脉充填
M1'-6	2-②f	4 160	4 652	492	1 777		11.16	80°闭合裂隙
M1'-7	2-②f	4 200	3 586	-614	1 844		10.62	矿物蚀变,粘土化
M1'-8	2-③f	3 920	2 829	-1 091	1 372	2.53	2.39	裂隙密集,裂隙面蚀变
M1'-9	2-③f	3 920	3 562	-358	1 667	2.53	6.59	陡倾,闭合裂隙面有蚀变
M1'-10	2-③f	3 900	2 978	-922	1 323	2.52	5.33	

表 4 T2'钻孔岩芯特征和测试结果

Table 4 Rock core characteristics and testing results in T2' borehole

样品号	岩组 编号	岩体测井纵波波速 $V_{mp}/m \cdot s^{-1}$	岩样纵波波速 $V_{rp}/m \cdot s^{-1}$	$V_{rp}-V_{mp}$ $/m \cdot s^{-1}$	岩样横波波速 $V_s/m \cdot s^{-1}$	岩样单轴抗压强度 R_c/MPa	备注
T2'-1	2-②	3 200	5 826	2 626	3 201	45.16	弱~强风化花岗斑岩
T2'-2	2-②	4 100	5 467	1 367	2 630	42.47	弱风化花岗斑岩, 80°闭合裂隙
T2'-3	2-②	5 000	5 623	623		87.78	
T2'-4	2-③	5 600	5 366	-234	2 927	18.02	60°交叉裂隙面,方解石脉充填
T2'-5	2-③	4 200	5 287	1 087		42.38	闭合裂隙,见Fe, Mn质薄膜
T2'-6	2-③	4 000	5 186	1 186	2 983	4.42	闭合裂隙充填方解石脉
T2'-7	2-③	5 100	5 048	-52	2 325	53.75	60°左右裂隙,充填方解石,绿泥石脉
T2'-8	2-③	5 050	5 830	780	2 781	121.06	
T2'-9	2-③	4 930	5 477	547		42.33	
T2'-10	2-③	5 730	5 712	-18		42.45	
T2'-11	2-③	5 600	5 606	6	3 037	142.7	
T2'-12	2-③	5 200	5 789	589	3 093	53.47	
T2'-13	2-③	3 320	5 316	1 996	2 791	26.75	
T2'-14	2-③	5 500	5 280	-220	1 733	17.50	30°闭合裂隙2组,见绿泥石脉
T2'-15	2-③	5 050	3 479	-1 571	1 598	47.66	近水平闭合裂隙,陡倾闭合裂隙
T2'-16	2-③	4 500	4 755	255	2 542	19.57	陡倾裂隙,充填方解石脉
T2'-17	2-③	5 700	4 539	-1 161	2 013	13.96	45°裂隙,裂隙面有蚀变
T2'-18	2-③	5 300	5 663	363	3 016		
T2'-19	2-③	5 600	5 653	53		100.36	无裂隙

表5 T10 钻孔岩芯特征和测试结果

Table 5 Rock core characteristics and testing results in borehole T10

样品号	岩组 编号	岩体测井纵波波速 $V_{mp}/m \cdot s^{-1}$	岩样纵波波速 $V_{rp}/m \cdot s^{-1}$	$V_{rp}-V_{mp}$ $/m \cdot s^{-1}$	岩样横波波速 $V_s/m \cdot s^{-1}$	岩样单轴抗压强度 R_c/MPa	岩芯特征
T10-1	2-③	5 000	5 668	668	3 288	54.98	闭合裂隙, 充填方解石脉
T10-2	2-③	5 730	5 636	-94	3 235	52.85	45°裂隙面2组, 间距1~1.5 cm, 裂隙面部分矿物蚀变
T10-3	2-③	5 579	5 685	106	3 067	51.22	
T10-4	2-③	5 579	5 580	1	3 065		80~90°裂隙充填方解石脉
T10-5	2-③	5 579	5 563	-16	3 252	53.73	弯曲裂隙面, 充填方解石脉
T10-6	2-③	5 890	5 608	-282	3 015	101.69	缓倾闭合裂隙
T10-7	2-③	5 890	5 601	-289	3 152	51.50	缓倾闭合裂隙
T10-8	2-③	5 579	5 320	-259	2 969	112.05	0°, 65°, 85°三组裂隙面, 充填方解石脉
T10-9	2-③	5 579	5 346	-233	3 032	80.98	0°, 65°, 85°三组裂隙面, 充填方解石脉
T10-10	2-③	5 730	5 779	49	3 113	176.97	
T10-6N	2-③	5 050	5 481	431	3 249	69.89	陡倾裂隙, 胶结好
T10-11	2-③	5 500	5 742	242	3 258	43.36	无裂隙
T10-12	2-③	5 500	5 710	210	3 260	73.32	无裂隙
T10-13	2-③	5 580	5 728	148	3 309	50.08	45°闭合裂隙, 胶结好
T10-14	2-③	5 580	5 892	312	3 213	77.72	无裂隙
T10-15	2-③	5 436	5 693	257	3 037	33.20	4组陡倾弯曲裂隙面, 充填方解石脉

表6 Y12 钻孔岩芯特征和测试结果

Table 6 Rock core characteristics and testing results in borehole Y12

样品号	岩组 编号	岩体测井纵波波速 $V_{mp}/m \cdot s^{-1}$	岩样纵波波速 $V_{rp}/m \cdot s^{-1}$	$V_{rp}-V_{mp}$ $/m \cdot s^{-1}$	岩样单轴抗压强度 R_c/MPa	岩芯特征
Y12-1	1-②	3015	3 112	97	9.89	泥质胶结
Y12-2	1-②	2970	2 536	-434	3.83	泥质胶结
Y12-3	1-②	3827	3 681	-146	6.44	泥铁质胶结
Y12-4	1-③	3618	3 061	-557	5.25	泥质胶结
Y12-5	1-③	3685	4 804	1 119	14.60	致密岩块, 由不规则角砾组成, 裂隙间充填方解石细脉
Y12-6	1-③	3210	3 276	66	10.92	微风化, 泥铁质胶结
Y12-7	1-③	3685	2 613	-1 072	5.87	裂隙密集, 泥质充填

一规律并不强, 这主要是一些蚀变的陡倾闭合裂隙对强度起着控制作用, 而波速对这种裂隙的反应不灵敏。沉火山凝灰角砾岩(表6)的强度受个别裂隙影响较小, 其岩芯卸荷的波速反映出波速与强度有着明显的相关关系。

另一方面, 岩石越软(弹模小), 受压后应变越大, 卸荷变形量也相对较大, 岩石因而变得疏松, 导致纵波波速降低。从M4', T2', T4'孔的统计看, 随着岩样动弹模的增大, 岩芯纵波波速与岩体测井波速的差值($V_{rp}-V_{mp}$)变小, 当岩样动弹模较高时, 岩样波速则不再小于岩体波速(见图2)。

(3) 裂隙特征

从表3~6还可以看出, 缓倾裂隙对岩芯波速的影响比陡倾裂隙对岩芯波速的影响大; 密集裂隙对岩芯波速的影响更大。比如, M1'孔的2, 3, 8号样由于缓倾和密集裂隙的存在, 岩芯波速明显低于岩体波速; 而4, 5, 6号样虽然存在陡倾裂隙, 但岩芯波速仍然高于岩体波速。T2'孔岩芯波速与岩体波速相减之值为最小的15号岩样, 是由于近水平裂隙的存在。Y12孔岩芯与岩体波速之差值为最小的7号岩样, 也是由于密集裂隙的存在。

这是由于波速是沿轴向测试, 缓倾和密集裂隙

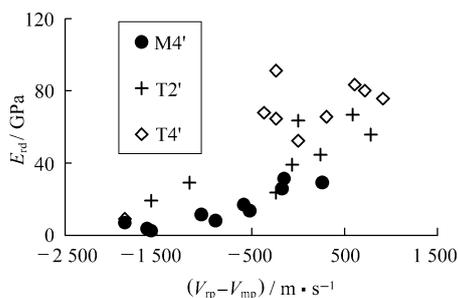


图 2 岩芯卸荷扰动的波速反应与动弹模的关系

Fig.2 Relations between dynamical elastic modulus and longitudinal wave velocity of rock cores due to unloading disturbances

卸荷后沿轴向张开，导致轴向波速降低；而陡倾裂隙对沿轴向测试的纵波波速影响不大。

(4) 胶结程度

从表 3~6 还可看出，胶结程度对岩芯波速的影响也很大。比如，Y12 钻孔岩体以泥质、泥铁质胶结为主，岩芯波速受卸荷扰动影响比较强烈；而局部的 Y12-5 岩芯裂隙间充填方解石细脉，胶结好，岩芯波速很高。

声波波速是一种综合指标，受多种因素影响。单纯用波速指标，有时难以辨别其影响因素，还会丢失许多有用信息^[6-8]。因此，本次研究对岩芯进行了大量的声波频谱分析^[9]。

图 3 为 Y12 孔岩芯声波频谱分析结果，更进一步说明了上述规律性分析：

Y12-2, Y12-4 样品，弱~强风化，泥质胶结；Y12-7 岩芯，裂隙密集，泥质充填。这两类样品，强度低，波速低，岩芯波速与岩体测井波速相比亦有明显降低(即卸荷敏感)。从频谱看，只在低频(<100 kHz)段有响应，高频信号已被岩芯滤波作用

衰减干净。

Y12-5 岩芯，与激发谱对比，各个频段均有响应(包括高频段)。说明介质滤波不明显。观察岩芯，由不规则角砾组成，裂隙间充填方解石细脉。其强度、波速均较高。同时，岩芯波速比岩体测井波速高 1 119 m/s，说明对卸荷不敏感。由此可见，岩石的强度、波速、频谱特征三者间有着明显的相关性，这些都取决于岩石的岩性与结构构造特征，并因此表现出不同的卸荷敏感程度，且规律性很明显。

4 桥基岩体卸荷敏感与地质历史、应力环境的关系

润扬大桥的桥址位于扬子板块，下扬子前陆褶皱冲断带，宁镇褶皱冲断带东北侧。桥址区经受了印支一早燕山期前陆褶皱冲断、中燕山期火山山弧发育、晚燕山—喜山期弧后一大陆内部伸展拉张等多期构造运动。形成不同方向、不同性质十分发育的断裂构造。断裂规模大，贯穿桥区的世业洲断裂宽达 400 m，横穿北部斜拉桥的夹江断裂宽度 80~160 m。加之地质史上断裂重复多次活动，造成岩体普遍破碎、强度低、胶结差^[10]。根据前面的分析，这样的岩体对卸荷扰动比较敏感。

桥址区中生代由于太平洋板块向亚洲大陆俯冲，构造应力以 NW 向主压应力为主；新生代则以本区 NWW 向挤压应力场为主^[11]。现今的主压应力方向为 NWW~SEE 向^[12~14]。同时，桥区第四纪覆盖层厚，基岩埋深由南往北逐渐变深，南部悬索桥区覆盖层已达 30~70 m；由于场区历史上是一个下降区，风化壳保存较厚，强风化层的厚度有十几米。原岩处于挤压应力环境，也使得岩芯取出后卸荷扰

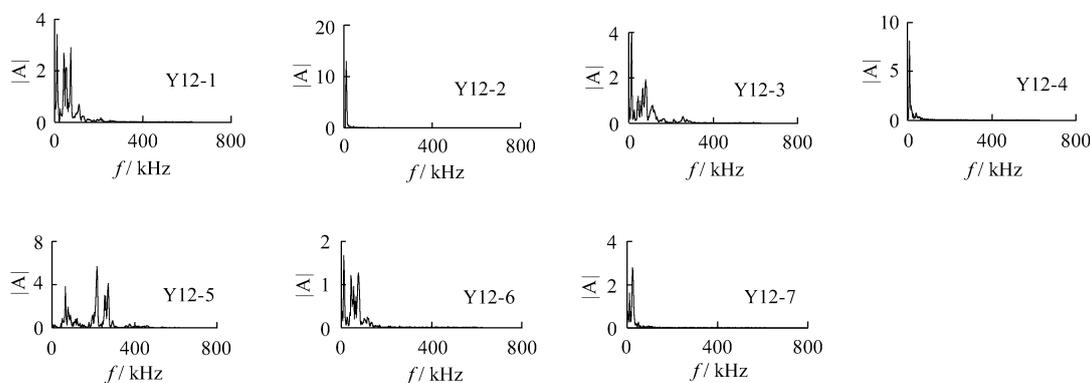


图 3 样品接收谱和频率响应

Fig.3 Receiving spectrum and frequency response of samples

动波速反应比较强烈。

5 卸荷敏感岩体的工程对策

鉴于桥区岩体具有明显的卸荷敏感的特点,在综合研究的基础上,作者认为在勘察、设计、施工中应注意下列方面:

(1) 由于声波对卸荷扰动非常敏感,在使用波速指标进行岩体质量评价(比如确定完整性系数)时应慎重。可结合岩芯鉴别描述、裂隙统计等方法,综合分析,以免误判。

(2) 注意勘探孔及时封孔防水,以免由于勘察扰动使基岩性质进一步恶化。

(3) 对于卸荷敏感岩体取得的力学指标可能偏低,结合三轴试验和原位试验,岩石基础或桩基设计参数可进一步挖潜。这已为后来的原位测试所证实。

(4) 对于卸荷敏感岩体,存在施工扰动使岩体进一步恶化的危险性。因此,施工方案宜采用分次分区开挖,紧跟支护,及时封闭围岩,注意防水等措施。

6 结 语

(1) 通过润扬长江大桥基岩的声波测试发现,采用通常方法测得的岩体测井纵波波速大多出现了反而大于岩样波速的现象。这一结果显然与传统认识不同。作者结合多种手段试验研究,分析了这一测试结果的可靠性。

(2) 国内外普遍使用波速指标评价岩体质量,新的国家规范中就是用波速定义岩体的完整性系数。上述结果的发现,提醒我们有些岩芯的声波速度对卸荷扰动非常敏感,在使用波速指标进行岩体质量评价(比如确定完整性系数)时应慎重。结合岩芯鉴别描述、裂隙统计等方法,进行综合分析是必要的。

(3) 出现岩样波速反而小于岩体测井波速的原因,主要是岩芯钻取扰动,即卸荷扰动。这从下列研究结果可以看出:软弱、破碎、裂隙(特别是缓倾、密集裂隙)发育、胶结差的岩体卸荷后波速会明显降低。换言之,这类岩体的波速对卸荷作用比较敏感。

(4) 岩石的强度、变形模量、波速和声波频谱特征有着良好的相关性。

(5) 润扬大桥,由于桥址区的基岩断裂发育且多次活动,岩体普遍破碎,强度低,胶结差,加之原岩处于挤压应力环境,使得岩芯卸荷扰动的波速反应比较强烈。由此可以解释润扬大桥岩芯波速普遍比岩体测井波速低的现象。同时,也揭示了决定卸荷敏感岩体的两个条件:一是岩体质量的内在特征,二是原岩的应力环境条件。

(6) 针对岩体卸荷敏感的特点,在该课题的研究中提出了勘察、设计与施工中应注意的问题。

(7) 本文提出了岩芯卸荷扰动和卸荷敏感岩体的概念,并分析了其影响因素。

对卸荷扰动度及其与岩体力学特性和设计参数的定量关系,尚需结合试验作进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 王让甲. 声波岩石分级和岩石动弹性力学参数的分析研究[M]. 北京: 地质出版社, 1997
- 2 林韵梅等. 数值分类方法及其在岩石力学中的应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1989
- 3 林韵梅. 岩体基本质量定量分级标准 BQ 公式的研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 481~485
- 4 边智华, 李维树. 南京长江二桥基岩的工程力学性质试验研究[J]. 长江科学院院报. 1999, 16(4): 42~45
- 5 水利电力部昆明勘测设计院. 水电站大型地下洞室围岩稳定性和支护的研究和实践成果汇编(“六五”国家科技攻关项目)[R]. 昆明: 水利电力部昆明勘测设计院, 1986
- 6 王兴泰. 工程与环境物探新方法新技术[M]. 北京: 地质出版社, 1996
- 7 Bath M. 地球物理学中的谱分析[M]. 郑治真, 叶正仁, 安镇文等译. 北京: 地质出版社, 1978
- 8 Seufert P K, Geller J T, Johnson L R. Effect of P-wave scattering on velocity and attenuation in unconsolidated sand saturated with immiscible liquids[J]. Geophysics, 1998, 63(1): 161~170
- 9 南京大学地球科学系, 江苏省交通规划设计院. 润扬大桥区域稳定性与岩体质量专题研究报告[R]. 2000
- 10 刘 彤, 徐鸣洁, 胡德昭等. 风化花岗岩声波频谱特征[J]. 高校地质学报, 2000, 6(4): 588~594
- 11 郭令智, 施央申, 马瑞士. 西太平洋中新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成与演化[J]. 地质学报, 1983, 57(1): 11~21
- 12 张庆龙. 南京地区新构造特征及其与地震关系[J]. 南京大学学报(地球科学), 1990, (4): 76~84
- 13 张绍治. 江苏地区现代构造应力场[J]. 江苏地质, 1989, (2): 3~9
- 14 朱履熹. 上海及邻区新构造应力场初步探讨[J]. 上海地质, 1990, (1): 45~55