

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2020.02.008

# 基于振动法的岩块纵波波速测试

孙蒙, 侯兴民, 张一林

(烟台大学 土木工程学院, 山东 烟台 264005)

**摘要:** 评价岩体完整性的定量指标  $K_v$  取决于岩体与岩块的纵波波速, 因此准确地测得岩块纵波波速是评价岩体完整性的关键环节之一。提出了利用振动法测量岩块纵波波速即利用布设在岩块两端横截面中心的两个振动加速度传感器采集振动信号, 通过互相关函数计算到时间差, 从而求得纵波波速。通过振动法和超声波法对不同岩性、尺寸、风化程度的 8 个岩块进行波速测试, 分析了各因素对岩块纵波波速测试结果的影响。结果表明: 振动法与超声波法测得的岩块纵波波速最大相对误差为  $-8.57\%$ 。采用振动法测试岩块纵波波速能有效减少频散效应对波速的影响, 提高了测试精度。

**关键词:** 振动法; 岩块纵波波速测试; 互相关函数

中图分类号: P589.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)02-0046-06

## Compression Wave Velocity Test of Rock Block Based on Vibration Method

SUN Meng, HOU Xingmin, ZHANG Yilin

(School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

**Abstract:** The quantitative index of evaluating rock mass integrity is the rock integrity coefficient  $K_v$ , which is depend on the compression wave velocity of rock mass and rock block, so accurately measuring the compression wave velocity of the rock block is one of the key steps in evaluating rock mass integrity. In this paper, the compression wave velocity of the rock block is measured by vibration method; the vibration signals are received by two vibration acceleration sensors arranged in the center of cross section at both ends of the rock block, and the arrival time difference are calculated by the cross-correlation function, so as to obtain the compression wave velocities. The wave velocities of eight rock blocks with different lithology, size and weathering degree were measured by vibration method and ultrasonic method, and the influence of each factor on the test results of rock block compression wave velocity is analyzed. The experimental results show that the relative error of rock block compression wave velocity measured between vibration method and ultrasonic method is as high as  $-8.57\%$ , and measuring the compression wave velocity of rock block by vibration method can effectively reduce the influence of dispersion effect on wave velocity and improve the test accuracy.

**Keywords:** vibration method; rock compression wave velocity test; cross-correlation function

岩块波速不仅能用于求得岩体完整性系数进而评价岩体完整程度, 还能综合反映岩石的结构和物理性质。《工程岩体试验方法标准》<sup>[1]</sup> (GB/T 50266—2013) (以下简称“标准”) 中提到的岩体波速测试方法很多, 如地震波法、超声波法等, 而规定岩块的波速测试只有超声波法, 对于振动法测岩块波速, 一直缺乏相关研究。

地震波和超声波两种弹性波在岩石介质中传播时, 其波速存在一定的差异, 超声波速度高于地震波, 主要是由于两种弹性波自身频率不同造成的<sup>[2-3]</sup>。工程岩体波速测试采用地震波法, 若岩块波速测试仍采用声波测试, 所得到的岩体完整性系数具有一定误差, 不能准确地判定岩体完整程度, 根据同一种弹性波激发所测出的波速得到的岩体完整

收稿日期: 2019-12-12

修稿日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41602284); 山东省专业学位研究生教学案例库建设项目 (sdyalk1797)

作者简介: 孙蒙 (1994—), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向为建筑与土木工程。E-mail: 1262469339@qq.com

通讯作者: 侯兴民 (1970—), 男, 山东寿光人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面教学与科研工作。E-mail: houxm@ytu.edu.cn

性系数才较为精确<sup>[4]</sup>。一直以来,岩块波速都是采用超声波法测试,国内外学者对其研究较多,也取得了许多成果。

Mckenzie 等<sup>[5]</sup>于 1982 年研究了超声波测试技术的可行性和仪器规格,利用从测试或钻孔中获得的声波速度和衰减参数  $Q$  (通过测量传播过程中脉冲形状的变化来估算) 来表征岩体完整性。李成波等<sup>[6]</sup>研究了岩石加卸载时超声波速与各弹性参数之间的变化规律,通过实测与理论推导的对比以及对该实验的回归分析,得出波速与泊松比等弹性参数有密切的关系。陈旭等<sup>[7]</sup>利用超声波法测定了三岩样的纵波波速及波形的时域特征,从而反映了岩石内部的情况。邵长云等<sup>[8]</sup>也是利用超声波法对岩样进行室内波速测试,利用测定的波速比来划分岩石的风化程度。由此看出岩块纵波波速在表征岩石损伤程度、综合评估岩石脆裂性、岩块物理力学性质判断和岩石质量指标评价等工作中也得到了广泛应用,因此岩块纵波波速测试的准确测量具有重要的意义。许强<sup>[9]</sup>则用地震波法和超声波法对岩体波速进行测试,对采用两种方法测得的数据对比研究差异规律,提出了将声波速度非线性折减为地震波速度计算岩体完整性系数。吴振祥等<sup>[10]</sup>对砂岩进行循环荷载下的疲劳加载,同时进行超声波速测量,并对提取的超声波信号进行小波变换,得到了波谱参数的敏感变化。李广场<sup>[11]</sup>通过多组岩块声波测试以及地震波测试岩体波速,地震波明显小于声波波速,且地震波速度变化幅度高于声波。

鉴于此,本文提出了利用振动测试的方法来对岩块纵波波速进行测试。振动测试法克服了因超声波频率不同所引起的岩块波速差异以及超声波受干扰和试验条件限制的缺陷,将振动传感器直接粘到岩块上,再配合上测试设备测出波速,通过对比超声波测试结果,表明本文方法可以精确地测得岩块纵波波速。

## 1 岩块纵波波速测试原理及数据处理方法

目前“标准”中给出的岩块波速测试的方法只有超声波法,但是该方法因波动走时难以准确获取,所得到的波速会有一定误差。岩块是由各矿物构成的含节理、裂隙的非均匀介质,由于频散效应,弹性波在岩块中的波速大小与其频率相关。对于同一岩块,激发不同频率的弹性波,所测得的纵波波速有一定差异。超声波测试得到的波速略高,一般高于地

震波 5% ~ 15% 左右,主要由弹性波的频散特性所致<sup>[2-3]</sup>。

而大多数实验室内进行测试的岩块尺寸较小,相比于岩体,岩块中所含有的节理微裂隙等结构面发育程度较低,可近似将其看作均匀弹性介质来看考虑。振动波与超声波都属于弹性波,其本质都是机械振动在介质中的传播过程,根据弹性波理论,均匀介质的纵波波速可由该表达式求得:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

式中: $E$  为介质的弹性模量; $\nu$  为泊松比, $\rho$  为介质密度。除了上述参数外,岩块的岩性、结构面发育程度、孔隙度、密度、软硬程度等不同,所得的波速就不同。

无论是用超声波法还是本文提出的振动法测量岩块纵波波速,都是激发岩块内的直达波来测得纵波波速。使用超声波法测量岩块纵波波速时,由于其频率较高,对波速的影响不能忽略。黄世强等通过实验室测试发现了声波频率从 25 kHz 增加到 1 000 kHz 时测得的玄武岩岩块纵波波速由 4 700 m/s 增大到了 6 000 m/s,呈明显的频散特征<sup>[12]</sup>。除此之外,换能器的耦合、波动走时的准确获取、防干扰措施不足等都会影响测试结果。岩块尺寸较小,波程较短,由于存在以上原因,超声波法在测量中很容易出现较大误差。对此,采用本文提出的振动法测试岩块纵波波速,各种实验条件布置得合理精细,在一定程度上使测试结果更加精确。

### 1.1 振动法测试的基本原理

本文提出的振动测试方法与超声波法不同的是,通过敲击岩块,激发振动波,在岩块两端横截面中心布设的高通频带振动加速度传感器,采集高频振动信号,再根据敲击点与传感器之间的距离关系对所求得的波速进行修正,确保所得的岩块纵波波速准确。振动法测试示意图如图 1 所示。

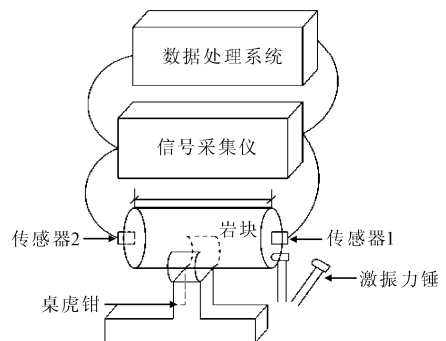


图 1 振动法测试示意图

如图 1 所示,试验设备主要包含了夹紧系统、信号采集系统、数据处理系统和激振系统。振动加速度传感器质量轻、体积小,便于与岩块试样粘贴,同时其灵敏度为 100 mv/g,通频带为 0.5 kHz ~ 10 kHz,能准确清晰地采集岩块高频振动信号。夹紧系统能有效地将岩块固定住,且与岩块试样的接触面积较小,能减少对测试结果的干扰。激发系统为 BY-L200 型力锤,用力锤在岩块横截面处沿垂直岩块横截面方向敲击激振。由于岩块尺寸较小,若采样频率设置不合理,采集的信号不能准确反映原始信号,使后续数据处理中识别的到时差精度不够,影响波速计算。因此在进行信号采集时,采样频率要达到 10 MHz。

## 1.2 数据处理

精确计算岩块纵波波速的关键是准确识别两个传感器接收振动信号之间的到时差  $\Delta t$ ,主要采用互相关分析法。互相关函数是描述输入信号与输出信号在任意两个不同时刻的相关程度。用互相关法进行时延估计,则是通过计算输入信号与输出信号的互相关函数的峰值点的位置来确定两函数的偏移量,从而得到到时差<sup>[13]</sup>。

设两个信号  $x(t)$  和  $y(t)$  由被测信号  $s(t)$  和噪声  $n(t)$  组成,即

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (2)$$

$$y(t) = s(t + \tau) + n(t) \quad (3)$$

式中: $\tau$  为延迟时间。根据前面的相关性的定义可知,随机信号  $x(t)$  和  $y(t)$  的互相关函数可定义为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt \quad (4)$$

式中: $T$  是随机信号  $x(t)$  和  $y(t)$  的采样时间。互相关函数  $R_{xy}(\tau)$  是  $\tau$  的函数,它完整地描述了两个信号之间的相关情况或取值依赖关系。

对振动信号  $x(t)$  和  $y(t)$  进行互相关分析,即对振动信号  $x(t)$  和延迟后的信号  $y(t + \tau)$  进行卷积运算,得到的结果就是振动信号  $x(t)$  和  $y(t)$  的互相关函数。互相关函数最大值对应的延时即为到时差  $\Delta t$ ,进而根据式(5) 求出岩块纵波波速。

$$V_p = \frac{L}{\Delta t} \quad (5)$$

式中: $V_p$  为岩块纵波波速; $L$  为岩块长度; $\Delta t$  为两个传感器接收到振动信号的到时差。

## 2 岩样制备及试验方法

### 2.1 岩样特征

选用大连液流电池储能调峰电站取到的辉绿岩,青岛金能洞库取的花岗岩、泥质灰岩三种岩性 8

个岩块作为测试岩样,将所要测量的岩块加工成圆柱岩样,两端面加工光滑。

岩块“标准”要求进行制备,圆柱体试件直径取 48 mm ~ 54 mm,高径比为 2.0 ~ 2.5。岩块两端面不平行度误差不大于 0.05 mm,高度、直径和边长的误差不大于 0.3 mm,端面垂直试件轴线且最大偏差不超过  $0.25^\circ$ <sup>[1]</sup>,同时也选取了几个不同直径及高径比的岩块进行对比。对于岩心长度和直径的测量工作,用游标卡尺直接测得,通过对多次测量结果取平均值来减小测量误差。本次采集加工的岩块样品的岩性、尺寸及风化程度如表 1 所示。

表 1 岩块样品的岩性、尺寸及风化程度

编号	岩性	风化程度	取样深度/m	直径/mm	长度/mm
H-1	花岗岩	未风化	107.8 ~ 108.2	100.05	50.05
H-2	花岗岩	未风化	117.5 ~ 117.8	95.07	51.08
H-3	花岗岩	微风化	151.2 ~ 151.6	104.90	50.40
H-4	花岗岩	未风化	87.6 ~ 90.0	105.00	50.40
H-5	花岗岩	微风化	24.3 ~ 24.7	346.10	49.80
N-1	泥质灰岩	微风化	32.6 ~ 33.0	105.00	69.10
L-1	辉绿岩	中风化	17.5 ~ 17.9	175.00	70.50
L-2	辉绿岩	微风化	21.8 ~ 22.2	174.50	70.50

### 2.2 振动法测试

实验前先将 COINV 数据采集仪、电脑、振动加速度传感器(频率响应 0.5 Hz ~ 10 kHz)、力锤等设备连接好,用桌虎钳将岩块固定。为了保证振动加速度传感器与岩块试样有较好的接触,用砂纸对岩块表面进行打磨,使岩块两端面清洁、无杂质,然后分别将两个传感器通过双面胶粘到岩块两端横截面中心,于测点 1 粘贴传感器 1 采集输入信号,在测点 2 粘贴传感器 2 采集输出信号。

调试设备及测试参数,测试时采样频率设为 10 MHz,采样时间为 2 s,用力锤在岩块横截面处沿垂直岩块横截面方向敲击激振,配合上 COINV 数据采集仪、电脑记录显示振动信号和波形,测得岩块纵波波速。

### 2.3 超声波测试

为了验证本文提出的振动测试方法的准确性,采用北京智博联的 ZBL-U510 非金属声波测试仪测量自然状态下各取样岩块的纵波波速,换能器工作频率为 50 kHz,换能器与岩块之间采用 TM-100 型超声耦合剂耦合。每个岩块重复测量 3 次,取平均值作为其纵波波速,记录岩块纵波波速。

## 3 试验结果分析

本次振动法和超声波法测试的结果如表 2 所

示。图 2、图 3 为振动法实测的试样 H-1—试样 L-2 八个岩块试样输入与输出端振动加速度传感器

采集下的水平互相关分析图以及加速度幅值时程曲线图。

表 2 岩块纵波波速测试结果

编号	岩性	风化程度	取样深度 /m	长度 /mm	直径 /mm	振动法波速测试结果/(m·s <sup>-1</sup> )	超声波法波速测试结果/(m·s <sup>-1</sup> )	相对波速误差/%
H-1	花岗岩	未风化	107.8~108.2	100.05	50.05	5321.8	5388.4	-1.24
H-2	花岗岩	未风化	117.5~117.8	95.07	51.08	5410.2	5512.3	-1.85
H-3	花岗岩	微风化	151.2~151.6	104.90	50.40	4811.9	4956.2	-2.91
H-4	花岗岩	未风化	87.6~90.0	105.00	50.40	5250.0	5287.4	-0.71
H-5	花岗岩	微风化	24.3~24.7	346.10	49.80	4614.7	4706.3	-1.95
N-1	泥质灰岩	微风化	32.6~33.0	105.00	69.10	3281.3	3442.7	-4.69
L-1	辉绿岩	中风化	17.5~17.9	175.00	70.50	4915.7	5326.8	-7.72
L-2	辉绿岩	微风化	21.8~22.2	174.50	70.50	5058.0	5532.1	-8.57

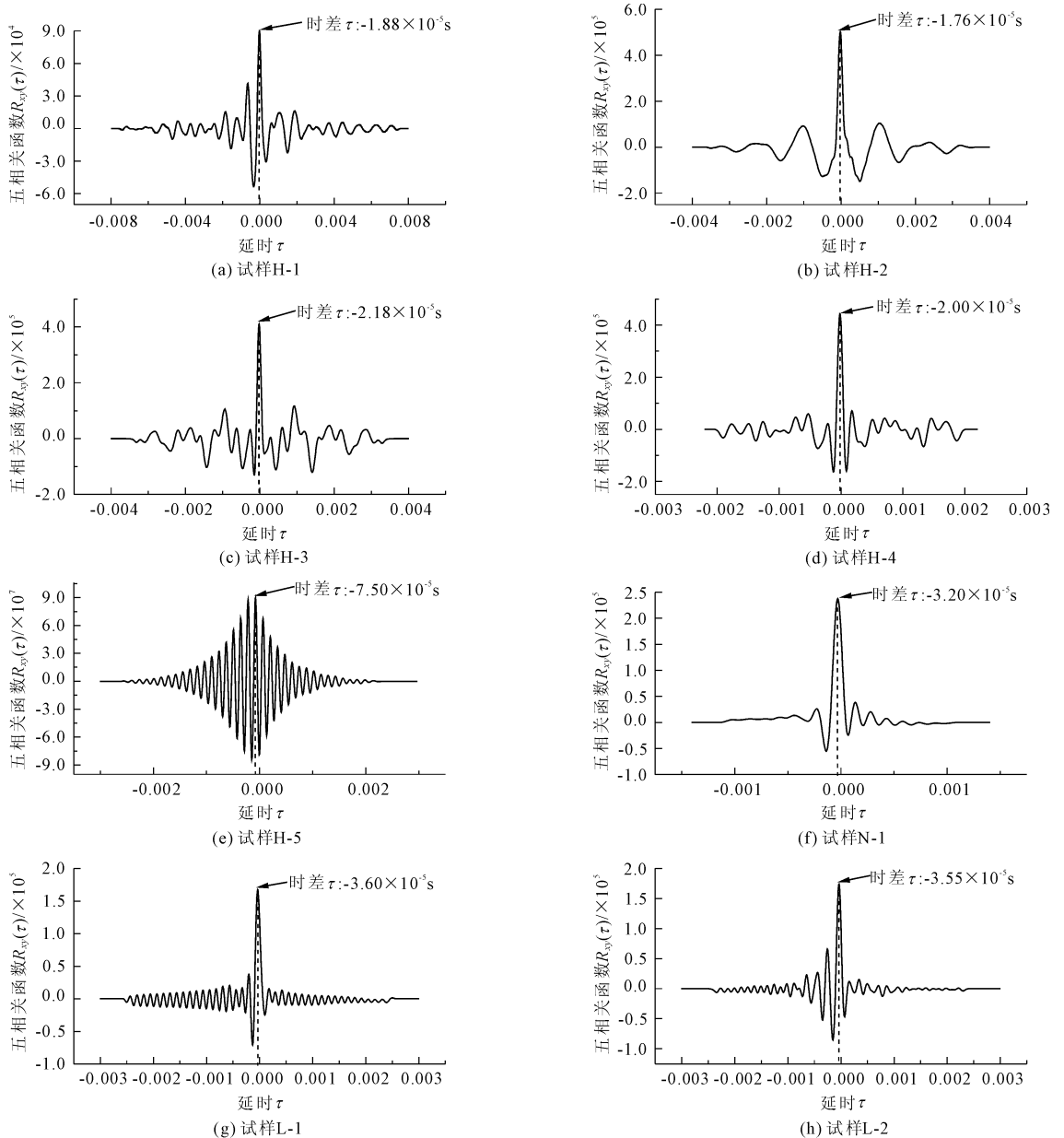


图 2 各试样水平互相关分析图

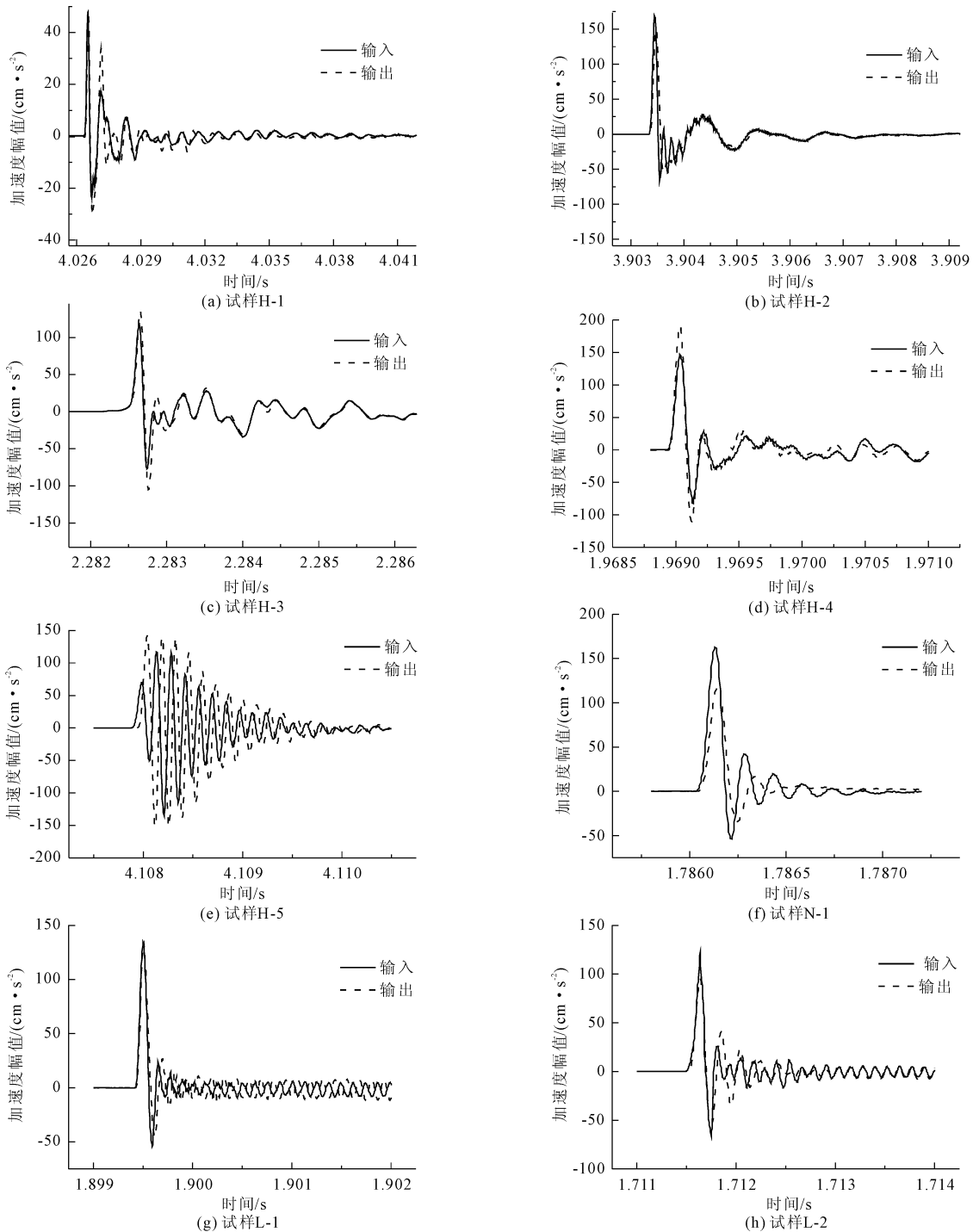


图 3 各试样水平加速度幅值时程曲线图

由表 2 可以看出,对于试验采用的三种不同岩性的岩块,测得的纵波波速有明显差异,但都在一定范围内波动。花岗岩的纵波波速一般为  $4\ 614.7\ \text{m/s} \sim 5\ 512.3\ \text{m/s}$ ,辉绿岩孔隙致密、坚硬,其纵波波速最高,一般为  $4\ 915.7\ \text{m/s} \sim 5\ 532.1\ \text{m/s}$ ,泥质灰岩的纵波波速大致为  $3\ 281.3\ \text{m/s} \sim 3\ 442.7\ \text{m/s}$ 。室内所测得的辉绿岩纵波波速高于花岗岩纵波波速,泥质灰岩由于其所含方解石等矿物较多为碎屑

状,松软易碎,波在岩块内传播时间相对较长,其纵波波速在三种岩性的岩块中最低。因此,岩性是影响岩块纵波波速最主要的因素。由于岩性不同,所加工出的岩样其固有频率、阻尼比、振型等固有特性不同,而岩样的固有频率决定了传感器的选择,只有当传感器的通频带高于岩样的固有频率时才能准确地采集下振动信号。因为岩性是影响岩块纵波波速最主要的因素,所以传感器的选择至关重要。

而对于同一岩性的岩块,由于受到节理、裂隙、孔隙度、软硬程度等因素的影响,其波速也有一定程度的差异<sup>[14-15]</sup>。当激发的纵波在传播路径上遇到上述影响因素时,会发生一定程度的绕射、反射、能量衰减等现象,增大了纵波的传播路径,使得测试得到的波速偏低,节理、裂隙越多,会大大降低波速值。相同尺寸新鲜未风化的花岗岩与微风化的花岗岩纵波波速采用振动法测试的最大相对误差为 8.3%,采用超声波法测试的最大相对误差为 6.7%,可见风化程度影响了整体测试结果<sup>[16]</sup>。所以在评价岩体完整性工作中应选取新鲜未风化的岩块进行波速测试。

岩块试样的高径比也是影响岩块纵波波速的一个重要因素。由表 2 可以看出,同一岩性、风化程度的岩块试样,随着岩块高径比增大,振动法和超声波法测试结果有所降低,但相对于振动法,超声波法测试结果的变化幅度较大。大多数情况下,较大的高径比的岩块试样中存在孔隙、节理、裂隙相对较多,会导致波速衰减,而标准试件或高径比较小的岩块,其所含的孔隙、节理、裂隙较少,能减小其对纵波波速测量结果的影响。

测试方法对岩块纵波波速也有一定的影响。在受到上述因素影响时,虽然振动法测试结果与超声波法测试结果有相同的变化趋势,但由于频散效应,在岩块中激发的弹性波频率不同,所测得的速度有一定差异,振动法测得的岩块纵波波速与超声波法测试结果对比,两者相对误差达到 -8.57%。

## 4 结 论

(1) 本文利用振动法测试岩块纵波波速,与超声波法测试结果对比,两者相对误差达到 -8.57%。采用振动法测试岩块纵波波速能有效减少频散效应对波速的影响,提高测试精度。

(2) 本文通过实测分析了各因素对岩块纵波波速的影响规律,同时发现在受到岩性、节理裂隙、风化程度等因素影响时,振动法与超声波法测试结果有着相同的变化趋势。

(3) 以往无论岩体波速测试采用振动法还是超声波法,岩块波速测试都是采用超声波法,据此所得到的岩体完整性系数  $K_v$  不准确。采用本文提出的振动法测试岩块波速能够有效克服因弹性波频率不同所引起的波速差异,从而精确地求得  $K_v$  值,更客

观的评价岩体完整性。

## 参考文献:

- [1] 工程岩体试验方法标准:GB/T 50266—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.
- [2] 段世委,许仙娥. 岩体完整性系数确定及应用中的几个问题探讨[J]. 工程地质学报,2013,21(4):548-553.
- [3] 徐松林,郑文,刘永贵,等. 岩体中弹性波传播尺度效应的初步分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(9):1348-1356.
- [4] 王清玉. 工程岩体弹性波测试若干问题商榷[J]. 人民长江,1993(9):41-47.
- [5] McKenzie C K, Stacey G P. Ultrasonic characteristics of a rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1982,19(1):25-30.
- [6] 李成波,刘振东,施行觉. 砂岩弹性参数与波速关系的实验研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(22):53-60.
- [7] 陈旭,俞缙,李宏,等. 不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(9):2527-2533.
- [8] 邵长云,钟庆华,葛双成,等. 利用岩体波速定量划分岩石风化度的试验研究[J]. 工程勘察,2012,40(3):87-90,95.
- [9] 许强. 岩体弹性波测试中超声波与地震波速度差异研究[J]. 水利规划与设计,2018(6):110-112,123.
- [10] 吴振祥,樊秀峰,简文彬. 基于多分辨率小波变换的砂岩累积疲劳损伤识别[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(5):108-112,141.
- [11] 李广场. 新鲜完整岩块波速的取值及应用[J]. 水利规划与设计,2014(2):84-88.
- [12] 黄世强,李广场,徐松林. 岩体的弹性波频散特性及等效模型研究[J]. 水利规划与设计,2014(2):8-10,15.
- [13] 全卜匀. 基于时延估计技术的声源定位方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
- [14] Mohammad R, Pouya K D, Iraj N. Studying the correlation of rock properties with P-wave velocity index in dry and saturated conditions[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019,169:49-57.
- [15] 王贵宾,杨春和,郭应同,等. 川东北地区岩石纵波速度分布特征和影响因素的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2834-2842.
- [16] 周倍锐,简文彬,陈晓贞,等. 某隧道工程岩体声学特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(3):25-29.