

# 瞬态瑞雷面波法岩溶路基注浆质量检测现场试验研究

郑立宁, 谢强, 冯治国, 任新红, 赵文, 王建珍

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**为深入研究瞬态瑞雷面波法在岩溶路基注浆质量检测中的应用, 现场选取 12 段试验区, 采集 1470 个测试样本点, 其中在 4 个重点测区中进行注浆前后的对比测试及部分注浆后长时间追踪测试, 在其余 8 个测区中进行验证性测试。结合现场压水试验及钻孔取芯等多种验证手段, 基于有效试验样本数据分别建立岩洞、岩体、土体 3 种不同地下介质的瞬态瑞雷面波法注浆质量检测标准, 并确定合理的检测时间为注浆完 7 d 后。经部分验证性试验区回判试验表明, 试验结论准确可靠。

**关键词:**瞬态瑞雷面波; 岩溶路基; 注浆; 检测; 现场试验

中图分类号: U416 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)12-1934-04

**作者简介:**郑立宁(1985-), 男, 吉林农安人, 博士研究生, 主要从事地质工程与岩体工程方面的研究。E-mail: zhengning2003@163.com。

## Field tests on grouting effect of karst roadbed based on transient Rayleigh wave method

ZHENG Li-ning, XIE Qiang, FENG Zhi-guo, REN Xin-hong, ZHAO Wen, WANG Jian-zhen

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To deeply study the use of transient Rayleigh wave method for detecting the grouting effect of karst roadbed, 12 sections in the field test area are selected, and 1470 test sample points are collected. The comparative tests on 4 important test areas before and after grouting and long-time trace tests are carried out. The confirmative tests on other 8 test areas are performed. Combined with the multiple confirmative methods of field water pressure tests and borehole coring and based on the effective test data, the criteria for detecting grouting effect of three different subsurface media such as cave, rock mass and soil are proposed by means of the transient Rayleigh wave method, and the suitable detecting time is 7 days after grouting. The confirmative tests show that the results are credible.

**Key words:** transient Rayleigh wave; karst roadbed; grouting; detection; field test

## 0 引言

随着高速铁路建设的如火如荼, 大量的高速铁路修建于岩溶发育区, 如已建成的武广客运专线及在建的南广(南宁—广州)高速铁路, 注浆加固逐渐成为整治路基岩溶病害的主要手段。由于注浆施工属于地下隐蔽工程, 注浆工程的质量检测工作显得十分重要。瞬态瑞雷面波法作为一种无损、快速、连续且经济有效的物探检测方法, 已经在铁路岩溶路基的注浆加固质量检测中广泛应用<sup>[1]</sup>。关于注浆质量的检测评定, 文献[2]规定瑞雷面波法用于评价地基加固效果应采用加固前与加固后两次观测对比的方法, 以波速的提高和曲线频散(曲线的形态和频散特征、“之”字形拐点和曲率的变化特征)的改善作为依据。咎月稳等<sup>[3]</sup>统计出面波剪切波速与承载力和变形模量之间的关系表, 并在既有宝中线岩溶病害注浆加固处理中利用瞬

态瑞雷面波法进行定性评价。另外相关单位<sup>[4]</sup>结合既有浙赣线岩溶病害注浆处理现场检测数据进行分析, 提出了一定的定量评判方法。

可见瞬态瑞雷面波法岩溶路基的注浆质量检测, 目前工程实际应用已比较广泛, 但现场注浆质量检测评判仍以定性及半定量为主, 评判的人为随意性较大。以前提出的定量性评判方法是通过部分既有线岩溶病害注浆整治的基础上得到的, 验证性数据偏少, 应用到岩溶广泛发育地区, 适用性不强。另外关于瑞雷面波法岩溶路基注浆质量检测研究少之又少, 且结合新建高速铁路, 进行大规模瞬态瑞雷面波法注浆质量检测的现场试验研究, 尚无人尝试, 基本没有可借鉴性

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目(2009G010-A); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU09CX014)

收稿日期: 2010-10-21

的经验。相对于工程中的大量应用, 检测理论的深入研究已大大滞后。本文依据新建南广铁路注浆施工现场中大量试验测区的检测试验成果, 并结合现场压水试验及钻孔取芯验证, 对瞬态瑞雷面波应用于岩溶路基注浆质量检测的方法、时间及相应的定量检测标准进行深入研究。

## 1 瞬态瑞雷面波法勘探原理

### 1.1 瞬态瑞雷面波法勘探基础

瞬态瑞雷面波进行工程地质勘察、检测主要是基于其以下特性: 均匀介质中, 瑞雷面波的传播速度与频率无关; 在分层介质中, 瑞雷面波具有频散特性, 即不同频率的波有不同的传播速度; 瑞雷面波的波长不同, 其穿透深度也不同; 瑞雷面波的传播速度与介质的性质密切相关, 即不同的介质不同状态下的波速不同, 根据波速差异可以分辨出介质特性。经室内外试验, 确定南广铁路地区试验现场部分岩土体瑞雷面波波速范围见表 1 所示。

表 1 试验现场部分岩土体瑞雷面波波速范围

Table 1 Speed ranges of transient Rayleigh wave of part rock and soil mass in test field

地下介质名称	面波波速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	地下介质名称	面波波速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
天然状态黏土	150 ~ 300	灰岩 (强风化)	500 ~ 1000
饱和黏土	100 ~ 250	灰岩 (微风化)	500 ~ 1500
卵石土	250 ~ 350	溶洞 (未注浆)	150 ~ 450
灰岩 (完整)	>1000	溶洞 (注浆后)	250 ~ 600

### 1.2 检测原理

瑞雷面波沿地面表层传播, 传播深度约为一个波长。因此, 同一波长的瑞雷面波的传播特性反映该地质条件下在水平方向的变化情况, 不同波长的瑞雷面波的传播特性反映着不同深度的地质条件<sup>[5]</sup>。

通过对现场检波器所测的频散曲线进行反演解释, 就可得到地下某一深度范围内的地质情况和不同深度的瑞雷面波速度  $V_R$  值, 而瑞雷面波速度  $V_R$  值的大小与介质的物理特性有关, 据此可对岩土的物理性质作出评价。

## 2 现场试验方法

### 2.1 仪器的选择

现场试验选用北京市水电物探研究所生产的 SWS-1A 型多功能面波仪。

### 2.2 现场检测布置

现场检测采用纵测线观测系统, 即激振点和检波器排列在一条直线上, 以测点为中心, 以 1 m 为间隔,

两侧各布置 6 个检波器。

### 2.3 激发方式

瞬态法勘探的结果主要受激发的瑞雷面波频率的影响, 本次试验采用 18 磅铁锤做为敲击震源。

### 2.4 偏移距的选择

瑞雷面波 (以下简称面波) 是横波和纵波叠加形成的次生波, 它的形成需要一定的时间和距离。其主要能量分布在一定的偏移距 (炮检距) 范围内, 现场试验检测时, 偏移距选择 3, 5, 10 m。

### 2.5 采样率及采样点数

一般工程勘探中为了提高采样精度, 提取更多地质信息, 数据采样率通常为 0.2 ~ 0.5 ms。采样率和采样点数之积即为采样时间。工程勘探要求最少要采集到一个完整的面波波型, 实际勘测中土层的面波波速最小在 200 m/s 左右, 最大偏移距为 26 m,  $T=130$  ms, 因此采样点数最小应为 1024 个。

### 2.6 注浆后检测时间的选择

水泥浆液凝固需要一定的时间, 凝固程度不同, 至注浆后不同检测时间测得的面波波速不同, 因此需要选择合理的检测时间。现场试验选取 D1K6+362.5 里程断面的 7 个测点作为研究对象, 对该断面中各测点在终序注浆后 1, 3, 5, 8, 15, 23, 28 d 分别进行检测。经数据分析后, 以 28 d 后稳定数据为波速提高率 100% 值, 其他值对比换算, 得测点溶洞处注浆后的波速提高率随检测时间变化曲线见图 1 所示。

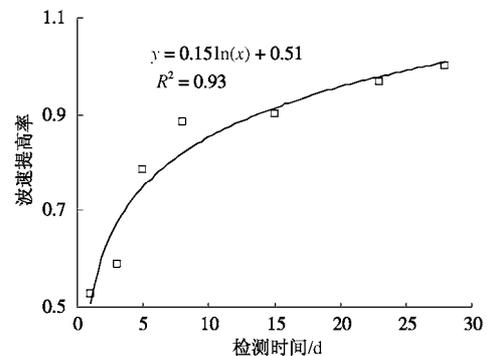


图 1 面波波速提高率随检测时间变化关系曲线

Fig. 1 Relationship between surface wave speed increase rate and detecting time

如图 1 可见, 经统计分析得注浆后面波波速提高率与检测时间为对数关系, 回归方程为:  $R=0.15\ln T+0.51$ , 互相关系数为 0.93, 相关性显著。由该公式得, 注浆完成 7 d 后面波波速提高率大于 80%。考虑到现场施工进度等因素, 实际检测中往往不能等到水泥浆完全凝固后再进行检测, 而检测过早则造成数据偏低失真。综合分析, 确定注浆完 7 d 后为合理的检测时间。

### 3 试验测区的选择

为提高试验测区的广泛代表性,结合现场区域岩溶的发育情况,试验共沿线选取试验测区 12 段,其中 4 段重点试验测区中测点进行注浆前及注浆后多次测试,局部测点进行注浆后长时间的追踪测试,其它 8 段试验测区中测点仅做注浆后的验证性检测试验。试验共采集测试样本点 1470 个(见表 2)。

表 2 测区分布及测试数据点统计

Table 2 Statistics of test areas and data points

里程范围/m	注浆前 测点/个	注浆后 测点/个	合计/个
D1K6+100—D1K7+207.18	215	255	470
DK15+500—DK15+800	0	18	18
DK16+020—DK16+628.745	0	61	61
DK33+158.24—DK34+145	0	111	111
ZDK40+624.38—ZDK41+100	24	37	61
ZD1K44+200—ZD1K44+900	102	0	102
ZDK46+600—ZDK47+300	0	63	63
DK63+550—DK64+155.686	0	48	48
DK95+000—DK96+000	128	178	306
DK96+000—DK97+131.254	0	108	108
IDK153+785—IDK153+937	0	24	24
IDK157+920—IDK158+700	0	98	98
总计	469	1001	1470

### 4 试验结果分析

#### 4.1 地下介质的判释

根据瞬态瑞雷面波法勘探原理中所确定的试验现场部分岩土体面波波速范围可知,现场以面波波速 500 m/s 作为土石分界的波速界限。地表下波速小于 500 m/s 的判释为土体;大于 500 m/s 的判释为岩体;如在岩体中出现波速低于 500 m/s,判释为异常体(岩溶洞穴为主)。由此在频散曲线图中根据波速大小和形态可确定地下介质的特征,且主要划分为岩洞、岩体、土体 3 种类型。

#### 4.2 有效测试样本点的选择

为确保试验数据合理有效,对现场实测数据分析研究中须剔除以下 5 种测试样本点:超出注浆范围测点,拟注浆范围为土石界面上 3 m 到下 5 m 之间;

由于测试点位注浆前后不符,试验误差造成的测试数据异常变化点;注浆前面波波速大于 1000 m/s,属于完整基岩测点;未进行压水试验或钻探取芯等方法对注浆质量进行验证的测点;利用压水试验或钻探取芯等验证,但注浆质量达不到合格要求的测点。

利用该筛选原则,共确定 25 个有效岩洞测试样本点,23 个有效岩体测试样本点,31 个有效土体测试样本点。

#### 4.3 注浆质量检测标准

##### (1) 岩洞注浆质量检测标准

对 25 个有效岩洞测试样本点进行统计分析,各测点岩洞深度及注浆前后面波波速散点分布见图 2。注浆后,对各有效岩洞测试样本点进行压水试验及局部钻孔取芯验证,确保各测点岩洞注浆合格率达到 95% 以上,基于此分析注浆后岩洞处的面波波速与岩洞埋深两者关系。利用统计工具回归分析得注浆后地下合格岩洞面波波速与深度具有良好的线性关系,线性方程为  $V=17.1H+236.9$ ,相关系数为 0.936,线性关系显著。

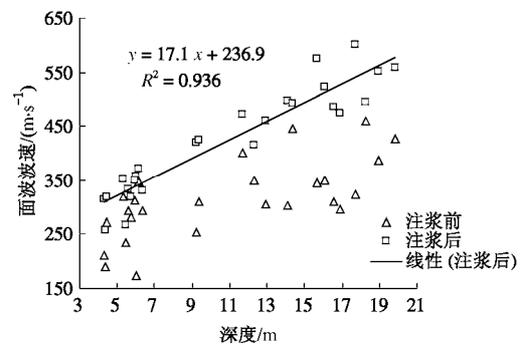


图 2 岩洞测点深度与注浆前后面波波速散点分布

Fig. 2 Distribution of test depth of karst cave and surface wave speed before and after grouting

##### (2) 岩体注浆质量评判标准

对 23 个有效岩体测试样本点进行统计分析,各测点岩体深度及注浆前后面波波速散点分布见图 3。与岩洞分析方法一致,得到地下合格岩体注浆后面波波速与深度的线性方程  $v=23.0H+321.1$ ,相关系数为 0.911,线性关系显著。

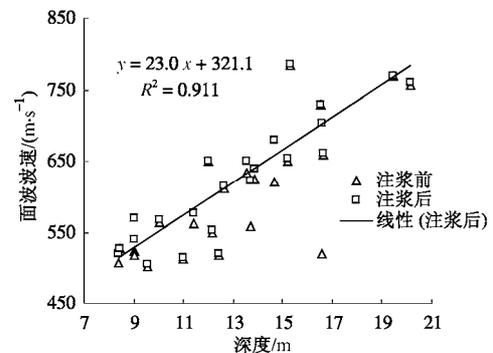


图 3 岩体测点深度与注浆前后面波波速散点分布

Fig. 3 Distribution of test depth of rock mass and surface wave speed before and after grouting

### (3) 土体注浆质量评判标准

对 31 个有效土体测试样本点进行统计分析, 各测点土体深度及注浆后面波波速散点分布见图 4。与岩洞分析方法一致, 得到地下合格土体注浆后面波波速与深度的线性方程  $v=20.6H+130.3$ , 相关系数为 0.961, 线性关系显著。

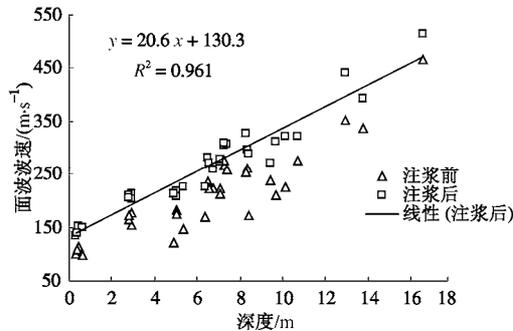


图 4 土体测点深度与注浆后面波波速散点分布

Fig. 4 Distribution of test depth of soil mass and surface wave speed before and after grouting

### (4) 注浆质量检测标准

通过上文分析建立瞬态瑞雷面波法岩溶路基注浆质量检测标准, 见表 3。

表 3 瞬态瑞雷面波法岩溶路基注浆质量检测标准

Table 3 Criteria of detecting grouting of karst roadbed based on transient Rayleigh wave method

地下介质类型	公式	相关系数	备注
岩洞	$v=17.1H+236.9$	0.936	深度 $H$ 为
岩体	$v=23.0H+321.1$	0.911	某一地层
土体	$v=20.6H+130.3$	0.961	的中点埋深。

注: 注浆后相应测点面波波速检测值  $\geq$  本标准值, 判释为注浆合格; 否则, 判释为注浆不合格。

## 5 试验结果的验证

利用前文建立的检测标准公式, 对 DK15+500—DK15+800 m, ZDK40+624.38—DK41+100 m, ZDK46+600—ZDK47+300 m, DK63+550—DK64+155.686 m, DK96+000—DK97+131.254 m, IDK157+920—IDK158+700 m 里程段共 6 个验证性试验区中 372 个测点进行定量回判。回判结果显示, 该 6 个试验区中共存在 46 个测点实测面波波速值低于检测标准计算值, 属于注浆不合格点。对该 46 个不合格点经钻孔取芯及部分压水试验表明, 不合格点包括大部岩洞、局部破碎岩体及少量土石界面处土体测点, 取芯基本未发现充填浆液, 检测标准判释准确率达 90% 以上。

## 6 结 论

(1) 瞬态瑞雷面波法应用于岩溶路基注浆加固质量检测仅需注浆后检测便可, 合理的检测时间为注浆完 7 d 后。

(2) 结合现场压水试验及钻孔取芯等多种验证手段, 基于试验结果建立岩洞、岩体、土体 3 种不同地下介质的注浆后瞬态瑞雷面波法注浆质量检测标准, 标准为面波波速与深度的线性关系式。

(3) 检测标准的应用为注浆后相应测点面波波速检测值与标准公式中波速计算值相对比, 大于等于标准公式中波速计算值, 判释为注浆合格; 小于标准公式中波速计算值, 则判释为注浆不合格。经 6 个验证性试验区回判试验表明, 试验结论准确可靠。但本检测标准主要基于岩溶大量发育的南广铁路试验区所建立, 是否能够符合其它地区, 有待于更多的试验验证。

### 参考文献:

- [1] 倪宏革, 李传明, 张令诺, 等. 洛湛铁路岩溶路基注浆加固效果检测[J]. 铁道建筑, 2004(8): 64—67. (NI Hong-ge, LI Chuan-ming, ZHANG Ling-nuo, et al. Detecting grouting effect of karst roadbed in LuoYang-ZhanJiang railway[J]. Railway Construction, 2004(8): 64—67. (in Chinese))
- [2] TB100B—2004 铁路工程物理勘探规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. (TB100B—2004 Specification for geophysical prospecting of railway engineering[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [3] 竺月稳, 马征远. 既有线路基注浆加固面波检测技术[J]. 路基工程, 2000(5): 38—40. (ZAN Yue-wen, MA Zheng-yuan. The technology of detecting grouting effect of karst roadbed in existing railway by rayleigh wave[J]. Subgrade Engineering, 2000(5): 38—40. (in Chinese))
- [4] 铁路岩溶路基塌陷注浆质量面波检测标准研究报告[R]. 武汉: 铁道部第四勘测设计院, 2002. (The research report of grouting quality rayleigh wave testing standard in collapse of karst railway embankment[R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 2002. (in Chinese))
- [5] 杨成林. 瑞雷面波勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1993. (YANG Cheng-lin. Rayleigh wave exploration [M]. Beijing: Geological Press, 1993. (in Chinese))