

# 土石混填路基强夯法施工质量无损检测技术

贾学明<sup>1,2</sup>, 杨建国<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学所, 湖北 武汉 430071; 2. 重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

**摘要:**对于土石混填路基强夯处治效果的评价, 还没有比较好的无损检测手段。采用测量面波速度的方法来评价强夯加固处治措施的效果, 在阐述了该方法的原理及特点后, 结合梁长高速公路的路基强夯实际工程, 应用该方法对该段高速公路的路基压实度进行了评价。结果表明: 强夯处治后面波速度的变化反映了岩土力学性质的变化, 利用测量面波速度的方法可以评价强夯加固处治措施的效果, 瑞利波法用于评价强夯施工效果高效、准确, 值得大力推广。

**关键词:**土石混填路基; 强夯; 瑞利波; 检测

中图分类号: TU472.3+2

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2008)05-0945-03

## Non-destructive Technique of Quality Detection on Soil-Rock Mixture Embankment Constructed by Dynamic Consolidation Method

JIA Xue-ming<sup>1,2</sup>, YANG Jian-guo<sup>2</sup>

(1. Institute of Rock & Soil Mechanics in Wuhan, Chinese Academy of Sciences, Hubei Wuhan 430071, China;

2. Institute of Chongqing Communication Research & Design, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** To evaluate the effect of dynamic consolidation method used in the construction of soil-rock mixture embankment, no non-destructive detection technique has been used until now. The effect of dynamic consolidation method is evaluated by measuring face-wave velocity. The principles and characteristics of this approach are expounded firstly. Then it is employed in evaluating the degree of compaction in the Liang-Chang Expressway embankment engineering. The result indicates that the change of face-wave velocity before and after dynamic consolidation reflects the change of soil-rock features and the effect of dynamic consolidation can be evaluated by measuring face-wave velocity. Rayleigh-wave used to evaluate the effect of dynamic consolidation is worth to be promoted actively because of its efficiency and accuracy.

**Key words:** soil-rock mixture embankment; dynamic consolidation; Rayleigh-wave; detection

## 0 引言

山区公路修筑中大量采用边坡开挖形成的土石混合料作为路基填料, 通常由于土石混合料堆积厚度较深, 需要采用强夯法施工确保路基的密实度。常规的强夯检测手段为静力触探、标准贯入试验、十字板剪切试验、载荷试验及取样进行室内试验。针对土石混填类材料而言, 静力触探、标准贯入试验、十字板剪切试验等应用都存在一定的困难。载荷试验成本较大、周期较长, 难以应用到大面积的强夯加固检测过程中<sup>[1-3]</sup>。

土体剪切波速度检测是近年发展起来的浅层地震勘探和对已加固地基进行科学评价的新技术。但剪切波速度的原位测试, 必须在地层中钻一个或多个孔, 即单孔法、跨孔法, 所需费用和时间也比较多。

由于面波波速和剪切波速的相关性<sup>[4-5]</sup> 瞬态面波法为工程物探和地基检测提供了高效快捷的手段。由于强夯处治后面波速度的变化反映了岩土力学性质的变化, 因而可以利用测量面波速度的方法评价强夯加固处治措施的效果。笔者从原理上分析了采用面波法检测强夯效果的可行性, 并进行了试验工程验证。结果表明, 面波法测试可以很好的评价强夯处治的效果。

## 1 瑞利波特点

地下介质中在激励下存在三种波的传播, 即纵波(P波)、横波(S波)和瑞利波(R波)。瑞利波具有如下特点:

收稿日期: 2008-09-18

基金项目: 重庆市科技攻关计划项目(CSTC, 2008AC6047); 交通部西部开发项目(200231800034)

作者简介: 贾学明(1974-), 男, 河南信阳人, 副研究员, 主要研究方向: 道路工程。E-mail: jiaxm2002@hotmail.com; Tel: 62653691, 13996288486。

1) 在地震波形记录中的各种信号中,面波的振幅最大,频率最小,能量最强,在不均匀介质中面波速度( $V_R$ )具有频散性。

2) 面波的传播速度  $V_R$  与横波速度有很好的相关性。其相关关系式为:  $V_R = V_S(0.87 + 1.12\mu)/(1 + \mu)$ , 此关系奠定了面波在测定土体物理力学参数中的应用。

3) 面波是沿地表传播的,且其能量主要集中在距地表一个波长( $\lambda_R$ )尺度范围内。依据上述特性,通过测定不同频率的面波速度  $V_R$  即可了解地下地质构造的有关性质并计算相应地层的动力学特征参数,达到工程检测的目的。

## 2 瑞利波用于强夯测试原理

路基的压实度是土石混填路基的重要质量指标,压实度为:

$$K = \rho/\rho_0 \quad (1)$$

式中,  $K$  为压实度;  $\rho$  为路基实际压实达到的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_0$  为标准击实验能达到的最大密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

剪切波与密度的关系为:

$$V_S = \sqrt{\gamma/\rho} \quad (2)$$

式中,  $V_S$  为剪切波速度;  $\gamma$  为剪切模量。

面波和剪切波的速度有以下相关关系:

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} V_S \quad (3)$$

式中,  $V_R$  为面波波速;  $\mu$  为泊松比。

对土石混合料而言,瑞雷面波波速与剪切波波速的关系如式(4):

$$V_R = (0.935 \sim 0.95) V_S \quad (4)$$

路基强夯过程中,土石混合料的压密导致路基的剪切模量和密度同时增大,由于剪切模量的增大速度比密度快得多,所以密度增大的同时波速也会增大。研究表明,弹性波波速和密度具有很好的相关性,一般弹性波波速与密度的相关关系式如式(5)<sup>[6]</sup>:

$$\rho = ae^{bV_R} \quad (5)$$

式中,  $a$  和  $b$  为相关系数。由此,压实度  $K$  可以用波速表示为:

$$K = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{ae^{bV_R}}{ae^{bV_{R0}}} = e^{b(V_R - V_{R0})} \quad (6)$$

式中,  $V_R$  为路基压实后实测的波速值;  $V_{R0}$  为振动击实试验得到的最大干密度  $\rho_0$  对应的波速值;  $a, b$  为常数,通过已知压实度作试验,最后回归分析所得。

根据这一关系式可知,介质密度增大面波速度也随之增大。由此建立了压实度与面波层波速之间关系,利用这一关系在其他路段作测试工作,得出各层层波  $V_R$ , 计算出各层压实度  $K$ 。因此,在一定条件下,可以直接用面波速度检测介质的密度。

瑞利波沿地表传播波速的频散现象,反映了与其波长相应的深度范围内的地层弹性分布。地层的弹性参数分布越不均匀,面波频散的表现也越复杂。对于横向均匀的分层地层,面波表现出可以区分和识别的频散特征,从而划分出不同的地层弹性分层类型。为提高检测的针对性,尽量减小分析的误差,在工程测试过程中提出了针对有效加固深度和范围的有效深度法:其中心思想是根据对强夯的有效加固深度、有效加固范围的计算,重点分析该区域(有效加固深度)的面波波速变化情况,并根据其对比结果进行质量评价和分析。

$$\bar{V}_r = \frac{\sum V_r}{n} \quad (7)$$

式中,  $\sum V_r$  为有效深度范围所有频散点的速度和,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $n$  为点数;  $\bar{V}_r$  为有效加固深度的平均波速。

由于频散曲线的分布沿着深度方向一般呈现浅部点密,深部点稀的特点,因此,在求取有效深度平均波速时应当按照不同的深度分别取值。一般按照每米深度内的波速值平均后再求取整个深度范围内的平均波速。

对于强夯加固方法,其有效深度计算公式如式(8):

$$h_y = \alpha \sqrt{QH} \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为折减系数;  $Q$  为夯锤重;  $H$  为落高。实践证明有效影响深度不仅与夯实能量有关而且与土性、夯锤面积等关系很大,在查阅国内外有关试验数据的基础上<sup>[7]</sup>,结合前述试验成果在西部地区的土石混填料可以取  $\alpha = 0.52 \sim 0.55$ 。

## 3 梁长高速公路强夯加固测试分析

梁长高速公路全线测设点起点位于梁平县白衣寺,接万(县)梁(平),高速公路终点位于长寿县郊桃花街。为了现场检测结果方便,强夯测试区域选择 K75+820 ~ K75+840 段,该区域现场填筑材料的颗粒粒径较为均匀,含石量普遍较小。最大干密度主要根据室内重型击实试验结果取得,其中最大干密度为  $2.05 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

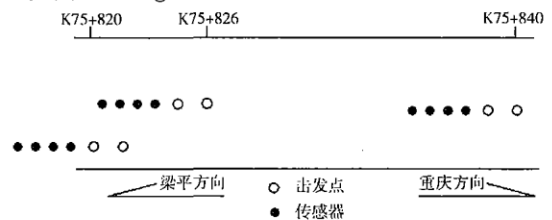


图1 梁长高速公路强夯测试布置示意

强夯加固处治落高 7 m, 夯锤 10 t。夯点间距  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ , 以顺序密夯, 每点夯击次数 3 ~ 4 次。

表1 梁长高速公路重型室内击实结果

土样编号	湿密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水量/ %	平均含水量/ %
1	1.95	1.87	4.4	4.45
			4.5	
2	2.09	1.97	6.4	6.15
			5.9	
			8.7	
3	2.24	2.06	8.6	8.65
			10.7	
4	2.16	1.95	10.6	10.65
			11.6	
5	2.05	1.84	11.5	11.55

现场测试根据不同段落进行,表2为图中各测试点的有效深度法测试结果表。根据表2的测试结果通过指数关系拟和得到关系式  $\rho = 1.0848e^{0.0027V_R}$ , 均方差  $R^2 = 0.9217$  (见图2)。并以此计算其它各个测点的密实度。

表2 梁长高速公路强夯测试结果

编号	夯前波速/ (m·s <sup>-1</sup> )	夯后波速/ (m·s <sup>-1</sup> )	加固前干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	加固后干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
K75+840 (1#)	167.17	208.27	1.72	1.84
K75+840 (2)	167.17	213.67	1.72	1.96
K75+840 (3#)	167.17	168.87	1.72	1.72
K75+833	190.53	222.64	1.79	2.00
K75+835	192.4	220.08	1.79	2.02

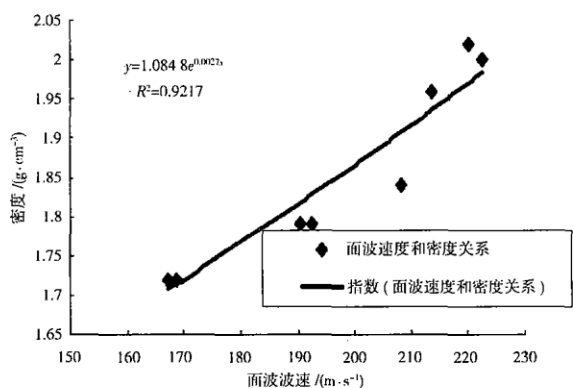


图2 面波波速和密度相关关系

表3为利用水袋法和有效深度法对比得到的梁长高速公路部分段落的密实度测试对比结果。从表3可以看出,使用面波计算压实度可以取得很好的精度。利用面波波速得到的压实度和灌砂法得到的结果比较一致,最大误差为7.2%,平均误差在1%~4%左右。因此利用有效深度法计算的强夯加固前后的密实度值是可靠的。

表3 面波计算压实度和压实度值对比

桩号	水袋法 干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	测试压 实度	测试平 均波速/ (m·s <sup>-1</sup> )	换算压 实度	相对 误差/ %
K75+834	1.89	92.35	223	97.58	5.66
K74+890	1.92	93.80	225	98.10	4.59
K74+870	1.72	83.71	192	89.74	7.20
K74+860	1.79	87.51	200	91.70	4.78
K77+725	1.99	97.18	222	97.31	0.13
K77+728 强夯	1.86	90.55	201	91.95	1.54
K77+731 强夯	1.88	91.82	207	93.45	1.77
K77+722 强夯	1.95	95.18	211	94.47	0.75

## 4 结论

通过以上的面波测试和密实度测试结果表明:

1)对强夯加固地基的质量评价应当从整体上对其进行评价。声波检测是通过声波在某一范围内地质体中的声波传播规律进行测试的方法,其测试结果能够代表整个测试范围内整体质量,并能及时反映该测试区域的潜在质量问题。因此,声波法测试在反映区域整体施工质量方面具有不可替代的优点。

2)利用有效深度法分析,可以有效的避免面波测试中其它范围内的点对测试结果的影响,一方面能够统一检测评价段落,另一方面能够提高分析的速度和精度。

3)根据项目综合测试方法可以建立面波速度在处治前后和土体密度的关系。选用指数函数作为拟合公式,从拟合情况可以看出,对于处治前后的拟合度一般达到90%以上。

### 参考文献:

- [1] 曾国熙.强夯法的发展与现状[C]//第四届土力学及基础工程学术会议论文集.北京:中国建筑工业出版社,1986:256-259.
- [2] 朱丹.强夯地基处理的几种检测方法比较和分析[J].广州建筑,2003(6):32-38.
- [3] 朱瑾.瑞雷波法在强夯地基质量检测中的应用[J].物探与化探,2005(6):15-18.
- [4] 杨成林.瑞利波勘探[M].北京:地质出版社,1993.
- [5] 杨成林,葛宝来,王炎.SM98瑞雷波仪测试原理及应用效果分析[J].物探与化探,2000,24(5):332-339.
- [6] 金宗川,汪稔,陈善雄.瑞利波速度和碎石土工程特性的相关性试验研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(1):94-100.
- [7] 杨建国.强夯法加固的主要设计参数研究[J].岩土力学,2004(8):685-689.