瑞利波法在高等级公路检测中的应用

林水珍
（上海同济大学工程建设监理工程公司，上海，200092）

提　要　本文介绍了高等级公路中瑞利波的弥散特性和传播特性，以及瑞利波分析测试方法和原理，并介绍了瑞利波测试分析方法在高等级公路中的应用。

一　引言

目前，高等级公路的建设日趋势增多，常规检测路面质量的弯沉法已不能满足要求，需一套能快速可靠检测道路施工过程中的质量的测试分析系统，及时为工程施工服务，确保工程质量，以及检测道路质量。表面波(瑞利波)在不同的土质条件下其传播特性和弥散特性都不相同，因此可利用现场所测瑞利波的弥散曲线，通过反分析得到土层参数(如土层和混凝土的厚度和剪切波速等)。本文首先简单介绍瑞利波在道路结构中的一些特性，并进一步介绍瑞利波法在高等级公路中的应用。

二　瑞利波特性

匀质半空间中瑞利波波速 V_R 为一定值，V_R=0.9～0.93Vs，即不具有弥散特性，波在深度方向衰减快，它的有效传播深度为 1.5 λ 左右，λ 为波长。

上软下硬地基(既土层的剪切波速度是随深度增加的)，研究表明，瑞利波具有弥散性，当波长很短时，其第一模态波相速度接近于最上层土的瑞利波速度，当波长长时第一模态波相速度趋近于最下层土的瑞利波速度[1]。第一模态波在深度方向上的有效传播深度为 1.5 λ，地基中波主要以瑞利波第一模态波形式传播[2]，现场测试为第一模态波。

道路结构地基一般可分为两种类型情况，一种是上硬下软地基(即结构的剪切波速随深度减小的情况)，这类地基中，当瑞利波波长减小时，第一模态波相速度趋近于最上层结构的瑞利波速，当波长长时，则趋于最下层结构的瑞利波速[3]，第一模态的传播深度很大，具体取决于阻尼比，且波动大，瑞利波水平向是衰减的；另一类道路结构是结构的剪切波速起初随深度减小(如在混凝土结构、垫层、填土等中)，而后剪切波速又随深度增加，这类道路结构在土木工程中经常遇到，这类地基中瑞利波的弥散性较为复杂，瑞利波第一模态波速度，波长长时波速趋于最下层土的瑞利波速，波长短时并不趋于最上层结构的瑞利波波速度。低频率时瑞利波主要以第一模态形式传播。而高频时结构中存在多个高模态波，现场所测波数是由这几个高模态波叠加而成的波的波数，随两传感器距离具有一定的

波动性[3]，所测弥散曲线趋于最上层结构的瑞利波速度(见图 1 所示虚线部分)。

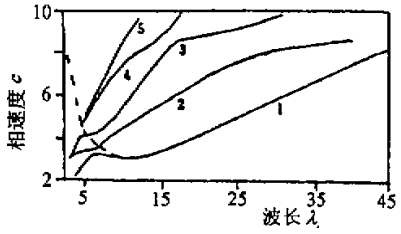


图 1　瑞利波弥散曲线

三　瑞利波测试原理

根据波动理论，在地表脉冲荷载作用下，体波在地表处产生的位移和瑞利波相比几乎可以忽略。在脉冲荷载作用下，瑞利波以圆柱面波的形式，从震源经传感器 1 向传感器 2 往外传播(见图 2)。设传感器 1 和 2 接收到的时域信号分别为 $x(t)$和 $y(t)$，则波从 1 行至 2 所需的时间等于 $x(t)$和 $y(t)$间的时间滞后。因此，求得 $x(t)$和 $y(t)$间的时间滞后，即可获得瑞利波速度。瑞利波在成层地基中的传播速度是随频率或波长改变的（弥散性），故只有通过频谱分析，才有可能确定 $x(t)$和 $y(t)$间的时间滞后。$x(t)$和 $y(t)$的自功率谱分别为 $G_{xx}(f)$和 $G_{yy}(f)$，互功率谱为 $G_{yx}(f)$，则可得 $y(t)$和 $x(t)$间的相差主角 ψ。图 3 给出了相位角 ϕ与频率的关系。设两传感器间的距离为 x，瑞利波沿 1 和 2 点直线传播，故由时间 t 可得速度 V_R。此外，由相位角 ψ及距离 x 还可得到波长 λ，从而可得到瑞利波弥散曲线，根据现场所测瑞利波弥散曲线，可进一步分析得到道路结构中各层的厚度及剪切波速度，从而能反映结构的强度变化。

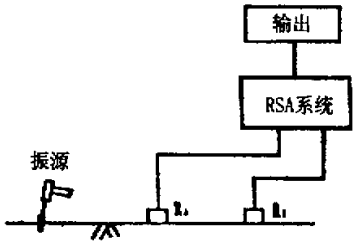


图 2　表面波测试图

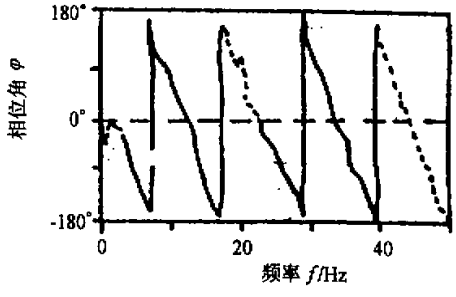


图 3　功率谱相位

四　瑞利波特性的应用

如上所述道路结构中瑞利波弥散特性与道路结构的性状有关，不同结构弥散曲线各不相同，因此可检测道路结构的力学性质。表面波法测试速度快，无需钻孔，不影响施工进

度、精度高以及费用低，越来越被工程界重视。下面就几方面讨论瑞利表面波法在道路工程中的应用。

1. 道路施工过程中质量检测

高等级公路施工中一般需要进行地基处理，如粉煤灰加固地基、排水预压固结、强夯、换土垫层和振密挤密等方法处理。地基处理后一般需了解地基处理的效果，为设计等提供可靠依据。表面波法可用来检测地基处理后地基的整体效果，这是跨孔法等无法实现的，并且具有测试速度快、可大面积检测、费用低等优点。可在施工过程中进行检测，及时提供现场数据，可控制施工的质量。

2. 检测道路质量

根据波动理论，道路各结构层的刚度按下式计算

$$E = 2\rho V_S^2(1+\mu) \tag{1}$$

式中 E 为杨氏模量，ρ 为质量密度，μ 为泊松比。大量试验结果证实，混凝土材料的强度和波速有一定的相互关系[4]，据此混凝土的剪切波速度可用于估算其强度。这种方法如辅以少量的破损性实验来确定相关系数，则表面波谱分析法所得到的混凝土强度指标相当准确。

根据瑞利波在成层介质中的传播特性，利用反分析法，可从瑞利波速度弥散曲线获得道路各结构层的剪切波速 Vs 和厚度[5]。道路能否满足正常使用要求，不仅取决于其各结构层的刚度和强度，还和结构层的相互接触是否良好等因素有关，表面波频谱分析法能对道面和垫层的接触情况和道路各结构层的刚度及强度组成作全面评价。

当道面和垫层接触良好及道面混凝土质量均匀时，图 2 所示的传感器 1 和 2 所接收到的信号的频率成份基本相同，在无环境噪声下所测得的相干函数接近 1；反之，当道面和垫层接触不良，即两者之间存在不均匀的“空隙”，或道面混凝土有离析或“蜂窝”等现象存在时，由于“孔隙”或“蜂窝”对波的反射，传感器 1 和 2 所接收的信号频率成份不一样，相干函数将远小于 1 或很乱。图 4(a)和 4(b)给出了两种情况的相干函数图。可见，利用表面波频谱分析法可方便地评价道面和垫层的接触性能。

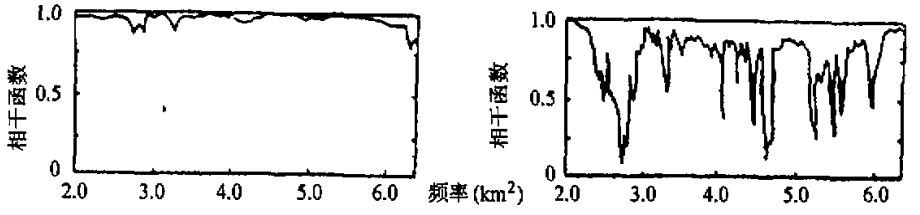


图 4 两信号的相干函数

五 结 论

瑞利波表面波法可在高等级公路施工过程中进行检测，及时提供现场数据，可控制

施工的质量；能可靠地测定成层结构各结构层的剪切波速度，确定相应的弹性模量，根据混凝土强度和波速度的相关公式，辅以少量的破损性实验，利用表面波法测得的剪切波速度可相当准确地确定混凝土强度；利用表面波法测得的相干函数和瑞利波速度弥散曲线，能可靠地评估道面和垫层的接触情况等，为大规模检测道面的施工质量提供了一条新的途径。

参考文献

[1] 夏唐代：《地基中表面波特性及其应用》，见《浙江大学博士学位论文》，1992.12。

[2] 夏唐代，吴世明：《稳态振动时平面内地基中波的能量分布》，见《浙江大学学报》，1994(增刊)．224-230。

[3] 夏唐代，丁狄刚，朱少杰：《道路结构中瑞利波特性》，见《第五届全国土动力学学术会议论文集》，大连，大连理工大学出版社，1998．439-444。

[4] 琼斯 R，弗格瓦 I：《混凝土非破损性试验法》，北京，中国建筑工业出版社，1965。

[5] Jones R. A vibration method for measuring the thickness of concrete road slabs in situ. Magazine of Concrete Research, 1955, 97-102.